

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ
Факультет інженерних систем і екології
Кафедра теплотехніки**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗДОБУВАЧА СТУПЕНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ МАГІСТР**

на тему:

**Оптимізація мереж теплопостачання шляхом мінімізації
відношення витрат первинної енергії до сумарної
встановленої потужності споживачів**

Заєць Ілля Андрійович

Київ 2025 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ
Факультет інженерних систем і екології
Кафедра теплотехніки**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Михайло КИРИЧЕНКО
« ____ » _____ 2025 року

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗДОБУВАЧА СТУПЕНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ МАГІСТР**

**Оптимізація мереж теплопостачання шляхом мінімізації
відношення витрат первинної енергії до сумарної
встановленої потужності споживачів**

Я як здобувач вищої освіти КНУБА розумію і підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував незгодувану допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Здобувач Заєць Ілля Андрійович
192 «Будівництво та цивільна інженерія»
ОПП «Теплогазопостачання і вентиляція»
Група ТВм-24-1
Керівник: **Погосов. О.Г**
доцент, кандидат технічних наук

Рецензент

Ідентичність підтверджую

Київ 2025 р.
**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет: Інженерних систем та екології

Випускова кафедра: Теплотехніки

Освітній ступінь: Магістр

Спеціальність 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

Освітня програма: Теплогазопостачання і вентиляція

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри теплотехніки

Михайло КИРИЧЕНКО

«___» _____ 2025 року

**ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
ЗДОБУВАЧА СТУПЕНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ МАГІСТР**

Заєць Ілля Андрійович

1. Тема роботи: Оптимізація мереж теплопостачання шляхом
мінімізації відношення витрат первинної енергії до сумарної
встановленої потужності споживачів

затверджена наказом ректора КНУБА _____ від _____ року

2. Керівник роботи

Погосов Олександр Григорович

доцент, к.н. технічних наук

3. Строк подання здобувачем роботи до захисту _____

4. Зміст пояснювальної записки за розділами:

Р. 1. Аналіз та шляхи розвитку українського законодавства в сфері вимог до енергоефективності будівель

Р. 2. Теоретичні основи оптимізації мереж теплопостачання

Р. 3. Постановка задачі оптимізації та математична модель

Р. 4. Методика чисельного розв'язання та алгоритми

Р. 5. Практичні розрахунки та приклад практичного використання програми

Список літератури

5. Графічний матеріал за розділами:

Р. 1. Ретроспектива сумарного споживання первинної енергії; Ретроспектива зміни показника внутрішнього валового продукту; Відношення питомого споживання енергії; Зміна населення (тис. люд) Київської області.

Р. 3. Залежність відносної похибки від діаметру для деяких швидкостей

Р. 5. Функції-рівняння моделі оптимізації систем теплопостачання

Р. 5. Функції-рівняння моделі оптимізації систем теплопостачання

Р. 5. Коефіцієнти (фактори) первинної енергії; Коефіцієнти (фактори) первинної енергії загальної енергетики.

Р.5. Програмна реалізація комп'ютерного моделювання витрати первинної енергії на ділянці теплової мережі.

Р.5. Програмна реалізація комп'ютерного моделювання витрати первинної енергії на ділянці теплової мережі (для побудови графіків зміни оптимальних значень).

Р.5. Моделювання сумарної приведенної енергії при центральному теплопостачанні мереж.

Р.5. Моделювання сумарної приведенної енергії при центральному теплопостачанні мережі

Консультанти розділів атестаційної випускної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Перевірив	
		дата	підпис
Розділ 2.	д.т.н. Скочко В.І.		
Розділ 3.	д.т.н. Скочко В.І.		

Календарний план виконання роботи:

Види робіт та їх зміст	Дата виконання
Розділ 1. Аналіз та шляхи розвитку українського законодавства в сфері вимог до енергоефективності будівель	02.10.25
Розділ 2. Теоретичні основи оптимізації мереж теплопостачання	14.10.25
Розділ 3. Постановка задачі оптимізації та математична модель	03.11.25
Розділ 4. Методика чисельного розв'язання та алгоритми	15.11.25
Розділ 5. Практичні розрахунки та приклад практичного використання програми	29.11.25
Остаточне оформлення роботи	14.12.25
Направлення роботи для перевірки на плагіат	16.12.25
Попередній захист роботи на випусковій кафедрі	22.12.25
Направлення роботи на рецензування	16.12.25

Дата видачі завдання _____

Керівник _____ (підпис)	<u>Погосов О. Г.</u> (прізвище, ініціали)
Здобувач _____ (підпис)	<u>Заєць І. А.</u> (прізвище, ініціали)

Київ 2025 р.

РЕЗЮМЕ (SUMMARY) до кваліфікаційної роботи здобувача:		Заєць Ілля Анрійович <i>Zaiets Ilya Andreyovych</i>	
ЗВО	Київський національний університет будівництва і архітектури		
Тема (українською та англійською)	<p><i>Оптимізація мереж теплопостачання шляхом мінімізації відношення витрат первинної енергії до сумарної встановленої потужності споживачів.</i></p> <p><i>Optimization of district heating networks by minimizing the ratio of primary energy consumption to the total installed capacity of consumers</i></p>		
Освітній ступінь	Магістр		
Факультет	Інженерних систем та екології		
Випускова кафедра	Теплотехніки		
Спеціальність	192 “Будівництво та цивільна інженерія”		
Освітня програма	Теплогазопостачання та вентиляція		
Керівник	Погосов Олександр Григорович		
Обсяг роботи:	пояснювальна записка, стор.	розділів	креслень формату А1
	110	5	9
Розділ 1.	Аналіз законодавства, порівняння норм, формування пропозицій		
Розділ 2.	Теоретичний аналіз, огляд методів, формування критеріїв		
Розділ 3.	Формулювання задачі, визначення змінних, побудова моделі,		
Розділ 4.	Розробка алгоритмів, чисельне моделювання, перевірка результатів		
Розділ 5.	Виконання розрахунків, демонстрація програми, аналіз результатів		
Висновки по роботі:	Робота виконана на високому рівні та заслуговує позитивної оцінки, а її автор присвоєння освітнього ступеня “Магістр”.		
Ключові слова: Keywords:	<p><i>Енергоефективність, Теплопостачання, Первинна енергія, оптимізація мереж, математичне моделювання, алгоритми розрахунків, когенерацію, гібридні системи</i></p> <p><i>Energy efficiency, District heating, Primary energy, Network optimization, Mathematical modeling, Calculation algorithms, Cogeneration, Hybrid systems</i></p>		

Здобувач: Заєць І.А.

Керівник: Погосов О.Г.

“ ___ ” _____ 2025року

Зміст

Вступ.....	11
Огляд літератури та нормативно-технічна база	13
1. Аналіз та шляхи розвитку українського законодавства в сфері вимог до енергоефективності будівель.	36
1.1. Аналіз енергоспоживання та потенціалу підвищення енергоефективності в системах теплопостачання.	37
1.2. Нормативно-методичні засади оцінювання первинного енергоспоживання в Україні.	37
1.2.1. Порівняльний аналіз енергоємності та перспективи сталого розвитку сектору теплопостачання.....	38
1.2.2. Нормативи енергоефективності будівель: проблеми впровадження та фінансові стимули.	42
1.2.3. Основні напрями сталого розвитку в будівництві та просторовому плануванні України.	46
1.2.4. Загальні висновки та узагальнення результатів	47
2. Теоретичні основи оптимізації мереж теплопостачання.....	50
2.1. Структура систем теплопостачання та фактори, що впливають на їх енергоефективність.....	51
2.1.1. Джерела теплової енергії як ключовий елемент структури.....	52
2.1.2. Мережева інфраструктура як транспортний компонент системи теплопостачання.	53
2.1.3. Споживачі теплової енергії і їх вплив на енергетичну ефективність системи.....	54

2.1.4. Взаємозв'язок компонентів і комплексний підхід до оптимізації.	55
2.1.5. Зовнішні та технологічні фактори.	55
2.2. Показники енергоефективності та методика оцінки первинної енергії.	56
2.2.1. Основні показники енергоефективності.	56
2.2.2. Поняття первинної енергії та її фактори перерахунку.	57
2.2.3. Методика оцінки первинної енергії для теплостачальних систем.	58
2.2.4. Особливості оцінки для когенераційних і гібридних рішень, стандарти та практичні підходи.	59
2.2.5. Особливості оцінки для когенераційних і гібридних рішень, стандарти та практичні підходи.	59
2.2.6. Аналіз невизначеності, валідація даних та використання в оптимізації.	60
2.3. Математичні моделі компонентів мережі та їх зв'язок у загальній моделі.	60
2.3.1. Роль математичного моделювання у системах теплостачання.	60
2.3.2. Моделювання основних компонентів системи.	61
2.3.3. Інтеграція компонентів у загальну модель та практичне застосування.	62
2.4. Теоретичні основи побудови оптимізаційних алгоритмів для теплових мереж.	64
2.4.1. Структура та особливості функціонування теплових мереж.	64
2.4.2. Моделі теплових втрат.	64
2.4.3. Класи оптимізаційних задач у теплових мережах.	65
2.4.4. Оптимізаційні методи та алгоритми.	65

2.4.5. Урахування невизначеності та динаміки процесів.....	66
3. Постановка задачі оптимізації та математична модель.....	67
3.1. Фізична концепція моделі теплової мережі.	68
3.1.1. Загальна характеристика котельні та споживачів.	68
3.1.2. Просторове розташування споживачів і структура мережі	68
3.1.3. Теплові навантаження споживачів та характер їх зміни.	69
3.2. Динаміка теплоносія та часові затримки.	69
3.2.1. Сталість швидкості руху теплоносія.	69
3.2.2. Час доставки теплоносія до віддалених ділянок мережі.	70
3.2.3. Внутрішня технологічна інерційність котельні.	70
3.3. Математичне формулювання процесів та структура моделі	71
3.3.1. Температурний режим довкілля та його вплив на систему	71
3.3.2. Структура математичної моделі	71
3.3.3. Основні спрощення та припущення	71
3.4. Відносна похибка.....	72
4. Методика чисельного розв’язання та алгоритми	75
4.1. Вихідні параметри	78
4.2. Основні обчислення.....	78
4.2.1. Витрата теплоносія.....	78
4.2.2. Відстань до споживачів та розташування у мережі	79
4.2.3. Температура подавальної води котельні.....	80
4.2.4. Температура подавальної води у споживачів.....	80
4.2.5. Потужність котельні.....	81
5. Практичні розрахунки та приклад практичного використання програми	84
5.1. Поняття енергії, ексергії та первинної енергії.	85

5.1.1. Поняття енергії.	85
5.1.2. Ексергія.....	85
5.1.3. Первинна енергія.	86
5.2. Порівняльний аналіз первинної енергії та ексергії.	87
5.3. Цільова функція та розрахунок оптимальних параметрів тепломережі.....	90
5.3.1. Порівняння та аналіз коефіцієнтів первинної енергії.....	97
5.4. Характерні оптимальні значення діаметру і швидкості.....	100
5.5. Програмна реалізація комп'ютерного моделювання витрати первинної енергії на ділянці теплової мережі.....	102
5.6. Програмна реалізація комп'ютерного моделювання витрати первинної енергії на ділянці теплової мережі (для побудови графіків зміни оптимальних значень).	104
Список літератури	107

Вступ

У сучасних умовах сталого розвитку та енергетичної безпеки питання підвищення енергоефективності теплопостачальних систем набувають виняткового значення. Зростання тарифного тиску на енергоресурси, вимоги Європейського та національного законодавства щодо зниження викидів парникових газів і підвищення ефективності використання первинної енергії висувають до проектувальників і експлуатаційних організацій нові технічні та економічні завдання. Особливо це стосується муніципальних і міських мереж теплопостачання, де інтеграція когенераційних, гібридних і відновлюваних джерел, а також оптимізація трубопровідної інфраструктури може суттєво знизити питомі витрати первинної енергії на одиницю встановленої потужності споживачів.

Метою даної магістерської роботи є розробка теоретичних та практичних основ оптимізації мереж теплопостачання на базі мінімізації відношення витрат первинної енергії до сумарної встановленої потужності споживачів, а також створення методики чисельного розв'язання та програмної реалізації алгоритмів для інженерно-проектних розрахунків. Для досягнення цієї мети поставлені такі завдання: проаналізувати чинне українське та міжнародне законодавство і нормативно-методичну базу щодо оцінки первинної енергії; визначити ключові показники енергоефективності; побудувати математичну модель компонентів теплової мережі та сформулювати цільову функцію оптимізації; розробити чисельні алгоритми та перевірити їхню ефективність на прикладі типового фрагмента мережі; забезпечити програмну реалізацію і провести практичні розрахунки з аналізом результатів.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному підході до мінімізації первинних енергетичних витрат з урахуванням реалій української нормативної бази, інтеграції когенераційних та гібридних

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рішень у модель, а також у вдосконаленні чисельних алгоритмів, які забезпечують оперативний підбір оптимальних гідравлічних та температурних режимів. Практична значущість полягає у створенні інструменту, придатного для використання інженерами-проектувальниками при розробці технічних рішень, що дозволить підвищити енергоефективність діючих і нових мереж, обґрунтувати техніко-економічні параметри модернізації й оцінити вплив законодавчих змін на інфраструктуру теплопостачання.

У роботі застосовано методи математичного моделювання гідротермодинамічних процесів у трубопровідних мережах, оптимізаційні підходи (функціональна мінімізація, градієнтні та еволюційні методи), чисельні алгоритми для розв'язання нелінійних задач, а також методи аналізу невизначеності і валідації результатів. Програмна реалізація виконана у вигляді автономної моделі для інженерного застосування з візуалізацією результатів та можливістю побудови графіків зміни оптимальних величин.

Очікувані результати включають набір рекомендацій щодо проектування та експлуатації мереж, програмну реалізацію алгоритмів оптимізації і приклади розрахунків для типових технічних умов, що може послужити базою для впровадження енергоощадних заходів у практику проектування теплопостачальних систем.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Огляд літератури та нормативно-технічна база

Перелік використаних джерел

У ході дослідження було опрацьовано низку наукових, нормативних та аналітичних джерел, що забезпечили теоретичне й методичне підґрунтя роботи. Наведений нижче список відображає основні праці, використані для аналізу та обґрунтування отриманих результатів.

- Оптимізація теплових мереж методом зменшення витрати первинної енергії — О. Погосов, В. Скочко, Є. Кулінко, Д. Тетерук (КНУБА, 2024).
- «Primary energy savings through thermal storage in district heating networks»
- “Thermal energy storage in district heating and cooling systems: A review” (Guelpa & Verda, 2019)
- «Techno-economic comparison of long-term thermal energy storage technologies for district heating applications»
- “A review of thermal energy storage systems for heating and cooling applications in buildings: Configurations, heat transfer analysis and models”
- «Primary energy factor for district heating networks in European Union member states»

Аналіз наукових статей з досліджуваної теми

Для глибшого розуміння проблематики було проведено аналіз сучасних наукових статей, присвячених обраній темі. Розглянуто роботи провідних вітчизняних і зарубіжних авторів, які висвітлюють теоретичні підходи, методології дослідження та практичні рішення у відповідній сфері. На основі цього аналізу визначено ключові тенденції, суперечності

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та наукові прогалини, що стали підґрунтям для формулювання власних дослідницьких завдань.

Джерело : Оптимізація теплових мереж методом зменшення витрати первинної енергії — О. Погосов, В. Скочко, Є. Кулінко, Д. Тетерук (КНУБА, 2024).

Зміст статті

У статті Погосов та ін. (2024) розглядаються методи підвищення ефективності централізованих систем теплопостачання шляхом оптимізації параметрів теплових мереж. Метою дослідження є розробка математичної моделі, яка мінімізує витрати первинної енергії на транспорт теплоносія від джерела до споживачів. Практично це досягається одночасним зниженням теплових втрат у трубопроводах та енергоспоживання насосів. Автори описують покроковий підхід: спочатку аналізуються питомі втрати тиску і теплові втрати, потім моделюється робота мережі з різними параметрами, а наприкінці виконується оптимізація.

Модель зосереджена на **геометричній оптимізації** конфігурації мережі (наприклад, вибір діаметрів і довжин труб), але з урахуванням двох основних факторів – гідравлічних втрат і трансмісійних теплових втрат. Зокрема, в моделі враховано питоме падіння тиску в трубопроводах і відповідне енергоспоживання насосів, а також лінійну густину теплового потоку і коефіцієнти втрат теплоносія. Як висновок, автори зазначають, що запропонована **математична модель** дозволяє комплексно оптимізувати мережу з урахуванням і енергетичних, і економічних факторів. Структурно стаття побудована як стандартне наукове дослідження: вступ з постановкою проблеми, огляд літератури, опис цілей та завдань, детальний опис моделі (з формулами (1)–(6)), і завершуються роботу висновками з пропозиціями щодо подальших досліджень.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Актуальність, новизна і внесок

Оптимізація теплових мереж є актуальним напрямом у зв'язку з необхідністю підвищення енергоефективності і зниження викидів парникових газів у централізованих системах опалення. Автори обґрунтовують, що традиційний аналіз енергії (теплового балансу) не враховує повною мірою втрат, пов'язаних з генерацією тепла та роботою насосів, тоді як використання первинної енергії дає змогу точніше оцінити ефективність (розглядати ексергетичний ефект).

У цьому зв'язку звертають увагу на дослідження в Європі: наприклад, у Нідерландах системний аналіз теплових мереж із урахуванням витрат енергії та викидів дозволив знайти оптимальні рішення для мінімізації втрат, а в Швеції ексергетичний підхід підтвердив важливість зменшення втрат на всіх етапах постачання тепла. Виходячи з того, що глобальна енергетична політика все більше акцентується на екологічності й стійкості енергосистем, робота набуває особливої значущості. Вона інтегрує традиційні методи геометричної оптимізації мережі (вибір діаметрів труб з урахуванням питомого тиску) з ексергетичним підходом, вводячи критерій мінімізації витрат первинної енергії на одиницю корисного теплового навантаження.

Таке поєднання вважається новим, оскільки попередні роботи або зосереджувалися лише на зменшенні теплових втрат (наприклад, Skochko et al. 2024), або на врахуванні капітальних витрат, але не об'єднували їх в єдиному ексергетичному критерії. Запропонована статтею модель має потенційно високий внесок в практику: її можна використовувати для проектування енергоефективних тепломереж з меншими експлуатаційними витратами та екологічними навантаженнями. В умовах України (та інших країн з централізованим опаленням) це дає змогу підвищити загальну ефективність систем і наблизитися до європейських

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

екологічних стандартів. Новизна роботи полягає саме в комплексному врахуванні гідравлічних і теплових втрат у функції мети з урахуванням коефіцієнтів перетворення первинної енергії, що відкриває новий погляд на оптимізацію мереж.

Аналіз літературних джерел

- **Baldvinsson & Nakata (2014)**

Автори виконали ексергетичний та економічний аналіз різних систем теплопостачання (Японія vs. локальні мережі). Важливий висновок – лише через ексергетичний підхід можна об’єктивно оцінити ефективність. Для статті Погосова це підтвердження доцільності критерію мінімізації первинної енергії.

- **Bagdanavičius, Jenkins & Hammond (2012)**

Розглянуто локальні енергосистеми на біомасі, де показано великі ексергетичні втрати при конверсії. Значення для статті – наголос на необхідності врахування втрат у всіх елементах системи, що кореспондує з урахуванням насосних і теплових втрат у моделі.

- **Ossebaard, Van Wijk & Van Wees (1997)**

Системний аналіз теплопостачання в Нідерландах до 2030 року, який довів переваги централізованих мереж над індивідуальними котлами з точки зору енергоефективності та екології. Для Погосова це європейський контекст і підтвердження актуальності оптимізації тепломереж.

Джерело: «Primary energy savings through thermal storage in district heating networks»

Основні ідеї, цілі та методи дослідження

Автори пропонують **мультишкальну модель резервуарів тепла**, що поєднує одномірний та тривимірний підходи, для аналізу роботи

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

систем накопичення тепла в мережах централізованого теплопостачання. Модель розроблена так, щоб прогнозувати вплив накопичувачів на споживання первинної енергії та грошові витрати в опалювальному сезоні. Для цього використано два сценарії роботи туринської системи теплопостачання: з двома когенераційними (КПД) установками загальною електричною потужністю 520 МВт та з однією установкою 260 МВт. Автори уточнюють, що комбінують спрощену 1D-модель бака з даними з CFD-моделювання: останнє проведено у програмі Fluent з урахуванням турбулентності за моделлю $k-\epsilon$. У моделі враховано як термосифонні й конвективні процеси у резервуарі, так і теплові втрати через стінки (див. рівняння енергії (1)–(3)). Розрахунки виконано числовими методами (крок по часу, схема «upwind» для конвекції, апроксимація «wall functions» біля стінок).

Отримані **результати** демонструють суттєве зниження витрат палива завдяки використанню сховищ. Так, для реальної конфігурації з двома КЕУ оптимальний загальний об'єм накопичувачів становить близько 32 000 м³, що дає економію палива ≈ 110 ГВт·год на рік ($\sim 12\%$). Навіть скромніший об'єм 3 000 м³ дає помітний ефект, а при об'ємі 10 000 м³ пікове навантаження згладжується до 400–680 МВт, що дозволяє уникнути ввімкнення допоміжних котлів (рис. 10) і збільшити віддачу електрики від КЕУ. У сценарії з однією КЕУ оптимальний об'єм – близько 12 000 м³, що забезпечує економію ~ 56 ГВт·год ($\sim 4.5\%$). Ці цифри узгоджуються з висновками авторів, які повідомляють до 11–12% економії первинної енергії та $\approx 5\%$ скорочення витрат при використанні сховищ.

Актуальність, наукова новизна та внесок

Робота має високу **актуальність** для енергетичної галузі: підвищення ефективності міських тепломереж напряму впливає на

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зниження викидів і збереження ресурсів. На тлі глобальних викликів — необхідності декарбонізації та інтеграції відновлюваних джерел — дослідження методів накопичення тепла виглядає особливо перспективним. Наукова новизна статті полягає у поєднанні детального CFD-моделювання внутрішніх процесів у баці з обчислювальною простотою одномірної моделі, адаптованої до довготривалої роботи протягом сезону. Такий підхід дозволяє врахувати розшарування температури, турбулентні втрати енергії і теплообмін зі стінками, водночас залишаючи чисельні розрахунки прийнятними для аналізу енергетичної системи.

Практична значущість роботи полягає у демонстрації **реальних економічних ефектів** від введення теплових акумуляторів у схему централізованого опалення. Показано, що достатньо одного-двох режимів накопичення, щоб забезпечити помітне зниження витрат палива та збільшення віддачі когенерації. Це важливо для інженерів і планувальників: надані результати можна використати для обґрунтування інвестицій у накопичувачі, оптимізації режимів роботи КЕУ та пониження теплових навантажень на допоміжні котли. В цілому стаття вносить вклад у розвиток стратегії енергоефективного теплопостачання міст, пропонуючи інтегровану модель та наочні показники ефективності для технічної та економічної оцінки систем зі зберіганням тепла.

Аналіз перших трьох джерел

(Lund et al., Energy 2010) – у статті розглядається роль централізованих тепломереж у перспективному сценарії повного переходу до відновлюваних джерел енергії (зокрема на прикладі Данії). Автори використовують детальний енергетичний системний аналіз, порівнюючи розширення тепломереж із альтернативними опціями (теплові насоси, міні-ТЕЦ) для 100 % ВДЕ-системи до 2060 року. Ключовий висновок –

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оптимальним є поступове розширення тепломережі разом із розвитком індивідуальних теплових насосів (замість суто відновлюваного індивідуального опалення). Це дослідження важливе для теми статті, оскільки воно підкреслює стратегічну роль **централізованого теплопостачання** у майбутніх енергосистемах з високою часткою ВДЕ. Тобто знайдено, що аби максимально використовувати «зелену» енергію, потрібна комбінація масової мережі з розвинутою когенерацією і новими технологіями. Напряму з математичною моделлю поточної роботи статті Дж. Лунд не пов'язаний, але її висновки слугують загальною концептуальною опорою про необхідність оптимізації роботи систем теплопостачання.

(Fruegaard et al., Waste Management 2010) – ця робота присвячена аналізу тепловіддачі сміттеспалювальних заводів у мережі централізованого теплопостачання Данії. Автори порівнюють два реальних приклади мереж, де тепло від спалювання ТПВ забезпечує близько 20 % потреби; при цьому типова методика оцінки викидів припускає 1:1 заміщення викидів зменшення теплових навантажень. Однак дослідження показало, що в одному випадку заміщення зменшило викиди CO₂ на ~48 кг/GJ, а в іншому навпаки додало ~43 кг/GJ (через відмінності у режимах роботи і типах палива інших установок у мережі). Таким чином, автори роблять висновок, що оцінювати ефективність використання тепла з відходів слід локально, враховуючи конкретну структуру мережі та її конігераційні установки. Для нашої теми це джерело цінне тим, що демонструє важливість системного аналізу енергетичних потоків у теплових мережах. Хоч моделі Дж. Фруергард мають іншу специфіку (вуглеводне-еквівалентні витрати, LCA, гібридні сценарії), загальна ідея про взаємодію джерел тепла і потреби в детальному моделюванні підтверджує необхідність складної аналітики в тепломережах. Безпосередньої зв'язку з математичною моделлю

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

накопичувачів тут немає, але виявлена закономірність про чутливість ефекту до режиму роботи КЕУ та котлів перекликається з висновками статті про зміну теплового навантаження.

(Faninger, Solar Energy 2000) – у цьому дослідженні розглядається поєднання сонячних колекторів із біомасовим опаленням у системах централізованого тепlopостачання Австрії. Автор аналізує, як спільне використання сонячних систем (для генерації тепла у літній період) і біомаси (для покриття зимового піку) може вирішити проблему сезонного невідповідного профілю попиту і пропозиції теплової енергії. Основний висновок – інтегровані сонячно-біомасові установки роблять автономні малі теплоцентралі більш привабливими для клієнтів, забезпечуючи покриття потреб у міжсезоння та зменшуючи частоту запусків біомасового котла. Для теми статті це джерело важливе тим, що ілюструє використання альтернативних накопичувачів (тепла від сонця) у складі теплової мережі. Хоч прямого відношення до математичної моделі резервуарів воно не має, концепція комбінування різних джерел і накопичення тепла є близькою за духом. Зокрема, Faninger показує практичну необхідність «накопичення» сонячної енергії для згладжування навантажень, що є аналогічною задачею, яку вирішує використання великомасштабних резервуарів у розглянутій статті. Таким чином, згадка про цю роботу підкреслює міждисциплінарне поєднання ідей: і сонячна, і біомасова енергія можуть інтегруватися у мережі з метою підвищення ефективності, а запропонована модель допомагає формалізувати та оптимізувати такі гібридні рішення.

Джерело: “Thermal energy storage in district heating and cooling systems: A review” (Guelpa & Verda, 2019)

Стаття Гуельпа та Верда (2019) є комплексним оглядом методів акумуляції теплової енергії у системах централізованого тепlopостачання

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та охолодження. Автори обґрунтовують необхідність TES (теплових сховищ) для подолання розривів між пропозицією та попитом тепла в мережах централізованого теплопостачання – зумовлених добовими та сезонними коливаннями попиту, коливаннями цін на енергію та переривчастою роботою відновлюваних джерел. У розділі 2 («Why storage technology...») розглядаються переваги та недоліки впровадження сховищ у ТЕЦ і тепломережі, а також пояснюється, як TES інтегрується з різними джерелами тепла (когенерація, сонце, біомаса, геотермальні та індустриальні відходи тощо).

Розділ 3 присвячений класифікації сховищ: розгляд охоплює **короткострокові** та **довгострокові** сховища з чутливим нагрівом (вода в баках або ґрунтові колектори), а також фазові (PCM) і **хімічні накопичувачі** – з урахуванням ступеня дослідницької готовності кожного виду. У розділі 4 аналізуються критерії ефективності сховищ (енергетичні й ексергійні показники, економічні аспекти). Розділ 5 нетрадиційно інтерпретує самі мережу та будівлі як «сховища» тепла – показано, як тепловий запас води в трубопроводах і термальна інерція будівель можуть змінювати баланс попиту та пропозиції. На завершення автори підсумовують основні висновки і окреслюють напрями подальших досліджень (зокрема, розвиток 4-го покоління тепломереж і мультисистемних енергомереж). Таким чином, стаття крок за кроком веде читача від обґрунтування важливості TES до деталей їх впровадження та перспектив.

Актуальність, новизна та внесок роботи

Стаття є надзвичайно актуальною у контексті трансформації енергетики: вона показує, що **накопичення тепла** в мережах ЦТ є ключовою технологією для інтеграції відновлюваних джерел і підвищення гнучкості енергосистем. Автори підкреслюють, що сховища дозволяють

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						21
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підтримувати баланс між нестабільним виробництвом (сонце, вітер) і змінним попитом на тепло. Це особливо важливо для майбутніх систем (наприклад, 4G_DH і мультиенергетичних мереж), де ЦТ стане частиною єдиного «розумного» енергетичного конгломерату з газовими й електричними мережами. Щодо **новизни**, робота Гуельпа і Верди відзначається великим охопленням теми: вперше в одному огляді скомпоновано обговорення коротко- і довгострокових сховищ з різними технологіями (сенсительні, фазові, хімічні) і проаналізовано їх готовність та здатність працювати в комплексі.

Автори також пропонують **нові підходи** до використання сховищ: наприклад, гібридне застосування того самого сховища для чергування теплосбирання й охолодження в різні сезони, а також більш широке впровадження сезонних ґрунтових сховищ і інтелектуальних систем управління. Цей огляд узагальнює останні напрацювання та ставить конкретні завдання для подальших досліджень (від розробки зручних методів вибору сховищ для міст до впровадження цифрових моделей мереж), що значно збагачує теоретичну базу і задає вектор практичної роботи у сфері ЦТ і TES.

Аналіз перших трьох джерел зі списку літератури **Lund et al. (2014) – 4th Generation District Heating (4GDH)**: у цій статті викладено концепцію четвертого покоління ТЕЦ, яке передбачає інтеграцію з «розумними» мережами та використання 100%-й відновлюваної енергії. Авторами обґрунтовано, що існуючі технології тепlopостачання необхідно суттєво модернізувати – робити мережі більш низькотемпературними, енергоефективними та інтегрованими з електричними і газовими системами.

Цей принцип 4GDH прямо перегукується з моделлю **мультиенергетичної мережі**, яку розглядають Гуельпа і Верда: вони

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

також підкреслюють, що сучасні ЦТ-системи «переходять до концепції мультиенергетики». Отже, праця Lund et al. забезпечує теоретичне підґрунтя для розуміння майбутнього розвитку ЦТ і підтверджує, чому в такий контекст необхідно впроваджувати теплові сховища.

Mancarella (2014) – MES (Multi-Energy Systems): ця оглядова стаття формує поняття мультиенергетичних систем (MES), де тепло, холод, електроенергія та інші енергетичні потоки взаємодіють оптимально. Автор показує, що такі системи (особливо з розподіленою когенерацією) можуть значно підвищувати технічну й економічну ефективність порівняно з класичними розділеними системами.

Таке бачення прямо співзвучне із підходом Гуельпи й Верди: вони розглядають ЦТ як частину **синергетичної енергосистеми**, де теплові сховища допомагають балансувати різні види енергії. Наприклад, у їх висновках згадується концепція розумної енергомережі (MES) – як мети подальшого розвитку ЦТ. Таким чином, Mancarella (2014) є важливим для статті джерелом, яке формує загальний теоретичний каркас (енергетичні «мультихаби»), у контексті якого впроваджуються описані у ній сховища.

Persson & Werner (2011) – Heat distribution and the future competitiveness of district heating: ця робота аналізує економічну конкурентоспроможність централізованого теплопостачання з урахуванням майбутніх змін попиту. Авторами показано, що у перспективі зниження теплового навантаження може підірвати вигідність ЦТ, якщо не оптимізувати розподіл та знизити капітальні витрати. Для нашої теми це важливо, оскільки ефективне використання сховищ може покращити економічні показники системи (наприклад, зменшити величину пікової генерації і знизити втрати тепла).

Гуельпа і Верда у статті, ймовірно, опираються на такі дані, щоб показати, чому безпекова функція TES – вирівнювання навантажень – є

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

одночасно економічною необхідністю. Зв'язок із моделлю авторів полягає в тому, що оптимізація розподілу тепла (предмет цього джерела) тісно пов'язана з динамікою мережі, яку впливають TES. Іншими словами, Persson & Werner надають ґрунтовну оцінку чинників, що впливають на рентабельність ЦТ, що доповнює аналіз Гуельпи й Верди щодо того, за яких умов сховища роблять мережу економічно і технологічно стійкішою.

Кожне з цих джерел закладає фундаментальні ідеї (майбутній розвиток ЦТ, концепція інтеграції різних енергетичних потоків, економічна життєздатність мережі), на яких базується модель авторів і роль TES у ній. Включення їх у огляд Гуельпи та Верди свідчить про ретельне охоплення літератури та глибину аналізу представленої проблематики.

Джерело: «Techno-economic comparison of long-term thermal energy storage technologies for district heating applications»

Зміст статті

У цій статті автори здійснили кількісне техніко-економічне порівняння різних технологій довготривалого теплового накопичення в системах централізованого тепlopостачання (ЦТ). Відправною точкою роботи є усвідомлення розриву між виробництвом і споживанням тепла в ЦТ (зокрема між сезонними та добовими профілями попиту та пропозиції).

Для подолання цих розривів у статті проаналізовано основні типи теплоаккумуляторів: **сенсительні** (великі водяні резервуари, ґрунтові поля, піщані котловани, шахтні сховища тощо), а також перспективні **латентні** і **хімічні** системи. Як наголошено в оглядовій літературі, в ЦТ використовують три фізичні принципи зберігання тепла: сенсительне, латентне та хімічне (термохімічне). Ключова частина роботи присвячена оцінці вартості, питомої ємності, втрат тепла та ККД цих технологій протягом сезону (на рівні тижнів – місяців).

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Автори описують методологію порівняння: спочатку визначено робочі сценарії (типові профілі споживання тепла), потім зібрано дані про конструкцію сховищ і їхню ефективність з довідкових джерел. Далі виконано розрахунок технічних характеристик і економічних показників (приведеної вартості тепла, собівартості накопичення тощо) для кожної технології. Основні етапи аналізу можна схематично навести списком:

- **Вибір і класифікація технологій:** автори розглядають **сенсигельні** сховища (нагріті водяні резервуари, ґрунтові і піщані польові сховища та підземні сховища високої температури), **латентні** (фазові матеріали) і **хімічні** (термохімічні, включно з адсорбційними системами) накопичувачі;
- **Збір даних і моделювання:** витрати тепла в мережі моделюють на основі стандартних навантажень, а характеристики кожного сховища (ємність, втрати тепла, ефективність) запозичуються з літератури та технічних специфікацій (з урахуванням термосифонних чи активних схем завантаження/вивантаження);
- **Розрахунок показників:** для кожної технології обчислено ключові величини – наприклад, питомі інвестиції (\$/кВт·год накопиченого тепла), питоме зменшення потреби в пікових потужностях і річні енерговитрати на утримання запасів (що можна корегувати коефіцієнтом термічних втрат);
- **Порівняння результатів:** в підсумковій частині виконано ранжування технологій за економічними критеріями, проаналізовано чутливість показників до зміни граничних температур та умов експлуатації, а також обговорено компроміси між щільністю накопичення і вартістю.

За результатами дослідження виявлено, що **водяні сховища** (включно з великими земляними котлованами і підземними резервуарами) зазвичай мають найнижчу вартість накопичення тепла на одиницю

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(порівняно з РСМ або термохімічними), проте вимагають значних територій і можуть мати більші втрати. Натомість **латентні сховища** забезпечують високу енергоємність (завдяки тепловому поглинанню фазового переходу) і мінімізують втрати через стратифікацію, але їхні матеріали суттєво дорожчі і складніші в інтеграції. В статті, наприклад, наводиться оцінка: інвестиційна вартість латентних сховищ (~45 €/кВт·год) у 4 рази перевищує вартість аналогічних сенсбельних резервуарів (~10 €/кВт·год).

Автори констатують, що **залежність між температурними режимами і витратами** зумовлює важливі компроміси – наприклад, при низькотемпературному ЦТ різниця в ціні між РСМ та простими водяними системами наближається до 1,5×, тоді як у високотемпературних мережах сенсбельні варіанти вигідніші. Також зазначено, що **хімічні (адсорбційні) сховища** мають надзвичайну енергоємність (наприклад, побудовано прототип зі щільністю ~400 МДж/м³), але поки що економічно доцільні лише для дуже специфічних сценаріїв.

У кінці статті автори підбивають підсумки: технологія вибору довгострокового накопичувача повинна базуватися на балансі між вартістю матеріалів, експлуатаційними втратами та доступним простором.

Так, поміщення великомасштабного підземного сховища на стороні споживачів може підвищити середню щільність енергії при зниженні об'ємів, але вимагатиме гнучких теплообмінних технологій. Отже, автори рекомендують продовжувати розробку та пілотування комбінаційних рішень (наприклад, сенсбельні сховища + фазові матеріали) з урахуванням специфіки конкретних ЦТ. *Висновки статті резюмуються приблизно так:* “вибір оптимальної технології довгострокового накопичення тепла для ЦТ залежить від багатьох факторів (кліматичних, економічних, технічних), та сучасні сенсбельні сховища забезпечують

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конкурентоздатну базу, тоді як фазові й хімічні рішення залишаються перспективними для майбутнього розвитку”.

Актуальність, новизна та внесок

Питання довгострокового накопичення теплоти в ЦТ надзвичайно актуальне в контексті декарбонізації енергетики та інтеграції відновлюваних джерел. Через нерівномірність річних та добових теплових навантажень з’являються “розриви” між генерацією і споживанням тепла.

Теплові акумулятори виступають буфером, що дозволяє вирівнювати ці розриви та знижувати дисбаланси: вони збільшують гнучкість системи, полегшують інтеграцію вітрової та сонячної генерації (наприклад, перетворення надлишку електрики в тепло) і зменшують потребу у додаткових пікових котельнях. За оцінками Міжнародного агентства з відновлюваних джерел та довгострокового зберігання, повсюдне використання теплових сховищ у Європі може зекономити приблизно 1,4 млн ГВт·год електроенергії на рік і уникнути близько 400 млн тонн CO₂-викидів. Таким чином, тема статті підпадає під пріоритетне наукове завдання – пошук рішень для «зимового зберігання» тепла, що дозволить значно скоротити енергоспоживання і викиди від систем опалення.

Новизна роботи полягає в комплексному **порівнянні** широкого спектру саме довготривалих (сезонних) технологій накопичення в одних умовах. У літературі раніше зустрічалися аналізи окремих рішень (наприклад, детальні дослідження гідротермальних або ґрунтових сховищ), але узагальнюючі **техніко-економічні огляди усіх ключових варіантів для ЦТ були відсутні**. Тим самим стаття заповнює наукову нішу – надає інструмент для порівняння **конкурентних технологій** з точки зору їх вартості, ефективності та практичної доцільності. З теоретичної точки зору, праця узагальнює та систематизує знання про характеристики TES у ЦТ, пропонуючи оцінки критичних параметрів

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(енергоємності, теплових втрат, капітальних витрат). З прикладної точки зору, результати можуть стати основою для вибору оптимального рішення в реальних проектах модернізації тепломереж.

Таким чином, актуальність статті визначається наступними факторами: (1) необхідність гнучкої балансувальної інфраструктури для очікуваного збільшення частки непостійних ВДЕ в системі теплопостачання; (2) економічний інтерес – сезонні сховища дозволяють знизити витрати на виробництво і транспортування тепла (скорочуючи потребу в дорого обходних пікових установках). Автори статті вписуються у загальне русло рекомендацій різних дослідників, що акцентують увагу на мультиенергетичних системах з інтегрованими накопичувачами. У підсумку, внесок роботи полягає у створенні аналітичного «інструменту» для стратегічного планування довгострокових сховищ у мережах теплопостачання.

Джерело: “A review of thermal energy storage systems for heating and cooling applications in buildings: Configurations, heat transfer analysis and models”

Про що ця стаття: У центрі уваги статті – огляд технологій акумулювання тепла (TES) в системах опалення та охолодження будівель. Перш за все, автори описують принцип роботи TES: **зберігання теплової енергії шляхом нагрівання або охолодження теплоакumuлюючого середовища для подальшого використання в системах опалення/охолодження..** Такі системи широко застосовуються в будівлях і промисловості, адже дозволяють вирівнювати нерівномірність попиту й пропозиції тепла, підвищуючи ефективність та надійність енергосистем, а також знижуючи витрати і викиди CO₂.

Стаття організована за тематичними блоками. Спочатку у вступі подається огляд актуальності TES для підвищення енергоефективності

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

будівель: зазначається, що лише в Європі завдяки поширенню теплових сховищ можна заощадити до $\sim 1,4 \times 10^6$ ГВт·год на рік і уникнути 400 млн тонн CO₂. Далі стаття систематизує **типи TES-установок та їх конфігурації**. Автори виділяють три основні методи зберігання тепла: *сенсбельне* (відповідне підігріванню середовища — вода, порода, пісок тощо), *латентне* (з фазо-перехідними матеріалами, РСМ) та *термохімічне* (реакційні матеріали). У рамках кожного класу подаються приклади конфігурацій: звичайні водяні баки, підземні сховища (нагрітий ґрунт, артезіанські води), ємності зі сипучим матеріалом (наприклад, гравійні акумулятори), а також схеми вбудованих архітектурних TES (термомасиви у конструкціях).

Наступний блок статті присвячено **аналізу теплопередачі в TES-системах та методам моделювання**. Розглядаються способи розрахунку ємності сховища і основні рівняння передачі тепла в різних середовищах (рівняння теплопровідності, конвекції, моделі стратифікації). Автори переглядають підходи до чисельного моделювання TES: наприклад, відзначають часте використання CFD-симуляцій (ANSYS FLUENT) для оптимізації конструкції і підвищення ефективності (що характерно і для сонячних колекторних систем). Також наведено приклади аналітичних та експериментальних моделей для розрахунку потоку тепла у водяних баках, у шаруватих гравійних резервуарах і в РСМ-матрицях. Автори узагальнюють результати попередніх досліджень щодо швидкості заряду/розряду сховищ і ефективності різних систем.

Основні висновки авторів: Стаття підсумовує, що **TES-системи здатні значно покращити енергоефективність будівельних енергосистем**.

Зокрема, зазначається, що латентні сховища з фазо-перехідними матеріалами можуть досягати вищої щільності зберігання енергії і ефективності (75–90%) порівняно зі звичайними (сенсбельними) сховищами. Авторам також вдалося узагальнити, що сенсбельні сховища

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		

(на основі води, ґрунту, каменю) прості та дешеві, але мають нижчу щільність енергії, тоді як РСМ-системи дозволяють компактніше зберігати тепло. До того ж у статті вказується на різні технологічні варіанти систем: активні (з насосами для теплоносія) та пасивні (вбудовані конструктивно), а також схеми гібридних систем (TES + тепловий насос, TES + когенерація тощо).

Актуальність, новизна та внесок

TES-системи є ключовим елементом стійкої енергетики будівель, адже вони *згладжують коливання попиту та пропозиції енергії* і «вирівнюють» графік навантаження. З огляду на кліматичні зміни та декарбонізацію сектору теплопостачання, робота має високу практичну цінність. Наприклад, Sarbu і Sebarchievici (2018) оцінювали, що широке впровадження теплових сховищ в Європі дозволило би заощадити до $1,4 \cdot 10^6$ ГВт·год/рік та скоротити 400 млн тонн CO₂. Такий масштаб робить тему надзвичайно актуальною для дослідників та практиків енергетики будівель.

Новизна статті полягає у **систематичному поєднанні огляду конфігурацій TES, теплообмінних аналізів та моделей** саме в контексті будівельних систем опалення/охолодження. Зауважимо, що хоча існує багато робіт з окремих аспектів TES (сенсительні сховища, РСМ, геліотеплові системи тощо), комплексних оглядів з цього поєднання менше. Автори заповнюють цю прогалину, узагальнюючи підходи до аналізу і моделювання TES, і пропонують методичний підхід до класифікації технологій.

Зі стратегічної точки зору, стаття вносить значний науковий вклад: вона не лише описує **теплотехнічні характеристики різних TES-систем**, але й оцінює їхню роль в енергосистемах будівель. Автори показують, як інтеграція TES здешевлює опалення і кондиціонування, збільшує

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

надійність систем (зменшуючи навантаження на пікові генератори) та сприяє використанню відновлюваних джерел. Цим робота допомагає сформувати методологічну базу для подальшого моделювання гібридних енергосистем будівель з урахуванням акумуляції тепла.

Наукова спільнота оцінює **внесок** цієї роботи як систематичне накопичення знань про TES у будівлях. Наприклад, в огляді Sarbu та Sebarchievici відзначено, що лиш небагато у цій галузі зумовлює інтенсивні дослідження (проекування, оптимізація сховищ, CFD-моделювання тощо). Стаття Wang et al. (як у заголовку) інтегрує ці підходи, вказуючи на конкретні механізми вдосконалення існуючих систем (наприклад, стратегічна стратифікація водяних баків, наднизький тиск закачки, нанокмпозиційні РСМ тощо) і пропонує напрямки майбутніх досліджень (тестування нових матеріалів, розвитку термохімічних сховищ, детальніших моделей CFD з урахуванням турбулентності тощо). Таким чином, робота є інноваційною та актуальною, бо відповідає на потребу оцінити і оптимізувати TES у контексті сучасних «зелених» будівельних технологій.

Джерело: «Primary energy factor for district heating networks in European Union member states»

Мета та методологія дослідження. Стаття латвійських та естонських авторів спрямована на систематизацію наявних даних щодо коефіцієнта первинної енергії (КПЕ, PEF) для мереж централізованого тепlopостачання (ЦТ) у країнах ЄС. Як наголошують автори, поняття КПЕ закріплене в Директиві ЄС 2010/31/ЄС (EPBD) для оцінки енергоефективності будівель, але підходи до його визначення різняться. Головна ідея роботи – провести *meta-аналіз* і огляд існуючих методик розрахунку PEF для систем ЦТ та виявити розбіжності між країнами. Дослідження побудовано як систематичний огляд законодавчих і

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нормативних джерел: автори спочатку відбирають країни-члени ЄС з істотним внеском ЦТ (населення, забезпечене теплом від мереж >1%), потім визначають і застосовують методи збору даних і, нарешті, класифікують та порівнюють отримані дані. Зокрема, у роботі виділено чотири етапи методології:

- відбір держав з важливим сектором ЦТ (частка жителів >1 %);
- формулювання критеріїв і методів збору інформації;
- збір інформації з відкритих джерел (законодавчих актів, стандартів тощо);
- класифікація, аналіз і порівняння зібраних даних.

Результати та моделі. За результатами аналізу автори класифікують практики встановлення КПЕ ЦТ у трьох основних типах. По-перше, у п'ятьох країнах встановлено *один фіксований КПЕ* для всіх мереж (наприклад, Болгарія, Данія, Естонія, Фінляндія, Франція). Значення цього показника наведено в табл. 2 статті; вони змінюються в діапазоні від 0,6 до 1,3. Важливо відзначити унікальність датського підходу, де для різних класів будівель використовують різні фіксовані КПЕ (0,8–1,0 для мінімальних вимог та 0,6 для «будинків класу 2020»). По-друге, у восьми країнах застосовують *диференційовані фіксовані КПЕ* – залежно від виду палива чи технології (наприклад, в Австрії, Чехії, Угорщині, Словаччині тощо). Наприклад, в Австрії для мереж з ефективною когенерацією за стандартом прийнято $KPE = 0,19$, для використання промислового відпрацювання – $KPE = 1,0$, хоча для окремих систем можливий розрахунок за нормами EN 15316-4-5. По-третє, у Італії, Німеччині та Польщі КПЕ визначається *індивідуально для кожної мережі*. Італійська методика (стандарт UNI/TS 11300:2015) передбачає базове значення $KPE = 1,5$, а Польща і Німеччина використовують так званий «податковий метод» (power bonus), описаний у EN 15316-4-5.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У тексті наведено також огляд «особливих випадків»: Швеція взагалі відкидає концепцію РЕФ; Хорватія має регіоналізовані розрахунки (опубліковано 18 різних КПЕ для різних мереж); Нідерланди застосовують РЕФ лише для електроенергії, а для ЦТ його не використовують. Отже, автори продемонстрували значні розбіжності в підходах до оцінки КПЕ ЦТ у ЄС.

Висновки статті. Дослідники дійшли висновку, що країни ЄС гнучко адаптують методику визначення КПЕ до національних особливостей, в результаті чого значення КПЕ для мереж ЦТ суттєво відрізняються між країнами. У висновках наголошено, що простий фіксований КПЕ не враховує комбінацій палива та модернізацій мереж, й пропонується розділяти мережі за їхнім «екологічним впливом» – знижуючи КПЕ для найбільш ефективних (оновлених, з КГР чи використанням ОВТ).

Таким чином, автори рекомендують відходити від єдиного значення РЕФ на користь обрахунку чи диференційованих показників, що точніше відображають реальне споживання первинної енергії й заохочують екологічні технології. Методологія ж авторів (систематизація «другорядних» джерел) передбачає розширення консультацій з експертами для уточнення даних у майбутніх дослідженнях.

Актуальність, новизна та внесок

Розробка унікального аналізу КПЕ для мереж централізованого теплопостачання є вкрай актуальною. Хоча до цього КПЕ для електроенергії в будівлях досліджувалось детально, визначення КПЕ ЦТ було менш опрацьованим. Водночас ЦТ забезпечує близько 9 % потреби ЄС у теплі (при споживанні будівлями половини всієї енергії Європи), і його раціональне використання критично для підвищення енергоефективності. Стаття Latđšov et al. вперше узагальнює «склад

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

численних моделей»: вона описує державні регламенти, стандарти та розрахункові процедури по всій Європі, заповнюючи прогалину в літературі.

Наукова новизна полягає у систематизації цих різних підходів та виявленні принципових відмін: якщо інші роботи переважно пропонували індивідуальні обчислення чи аналіз ПЕФ для електроенергії, то ця — комплексно порівнює державні методики для теплопостачання. Внесок роботи в практику – це надання еталонної бази даних і рекомендацій: наприклад, автори показують, що узагальнена оцінка КПЕ дозволяє впорядкувати політику енергоефективності будівель (PEF входить до показників енергетичної ефективності за EPBD) і стимулювати модернізацію ЦТ-систем (низькі КПЕ «нагороджують» підприємства з меншою витратою енергії). Підсумовуючи, статтю можна вважати цінним внеском у енергетику та інженерну практику — вона «ставить дзеркало» перед існуючими нормами та пропонує уніфікацію: «уніфікація процедури визначення КПЕ для всіх країн ЄС» називається одним з можливих рішень.

У контексті **енергоефективності** та **централізованого теплопостачання** робота цілком пасує. Показник КПЕ прямо використовують у розрахунках енергоефективності будівель (за Директивою EPBD нарощення частки нульового енерговикористання потребує зокрема врахування первинної енергії). Іншими словами, підхід статті відповідає сучасним трендам: наприклад, у новій редакції EPBD від 2024 року значно посилено вимоги до цифровізації сертифікатів та баз даних будівель (що вимагає чітких КПЕ) і нарощення частки відновлюваних джерел тепла. Щодо **цифрового моделювання**, хоча автори не виконували симуляційні розрахунки мереж, їхні дані можуть слугувати важливим вхідним параметром для цифрових двійників теплових систем (наприклад, для оцінки ефективності мереж чи

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оптимізації термостатних режимів). З іншого боку, з точки зору **ексергетичних підходів**, КПЕ відображає енергетичний баланс за Першим законом термодинаміки (енергія як консервативна величина), тоді як ексергія вимірює якість енергії. Відомо, що системи опалення мають дуже низький ексергетичний ККД навіть при високій енергоефективності.

Зокрема, стаття Evola et al. (2018) показує: «навіть якщо енергетичні втрати мінімальні, ексергетичні втрати можуть залишатися дуже великими через необоротність процесів». Це означає, що хоча розгляд первинної енергії (PEF) важливий, ексергетичний аналіз дає додаткові підказки щодо раціонального використання тепла. Таким чином, результати Latđšov et al. доповнюють ширший портрет: їхні висновки з використання PEF слугують **комплементом** (доповненням) до ексергетичних і цифрових методик оптимізації теплоенергетичних систем.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ №1

“Аналіз та шляхи розвитку українського законодавства в сфері вимог до енергоефективності будівель.”

Керівник: Кандидат технічних наук Погосов О.Г.

(Підпис)

(Дата)

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.1. Аналіз енергоспоживання та потенціалу підвищення енергоефективності в системах тепlopостачання.

Енергоспоживання первинних енергетичних ресурсів є складним багатофакторним процесом, що формується під впливом технічних, економічних, організаційних та соціальних умов. Для забезпечення ефективного функціонування системи тепlopостачання необхідно здійснювати оцінку та контроль ключових параметрів, пов'язаних із виробництвом, транспортуванням, розподілом і кінцевим використанням енергії. Кожна із підсистем тепlopостачання має власні методи оцінювання енергетичної ефективності, що формують багаторівневу структуру аналізу. Зокрема, нормативні вимоги України містять чіткі положення щодо понять первинної енергії, енергопотреби та енергоспоживання, а також визначають підходи до їх розрахунку та нормування.

1.2. Нормативно-методичні засади оцінювання первинного енергоспоживання в Україні.

В останні роки Україна офіційно задекларувала курс на інтеграцію європейських принципів сталого розвитку, впровадження політик енергоефективності та гармонізацію законодавства із нормами Європейського Союзу. Проте значна частина будівельного фонду країни сформована у радянський та пострадянський періоди, що обумовлює високі тепловтрати, низький рівень теплозахисту та морально застарілі інженерні системи. Такий стан об'єктів вимагає проведення широкомасштабної реконструкції, термомодернізації та реновації з метою підвищення енергоефективності й зменшення експлуатаційних витрат. Водночас реалізація цих заходів сприятиме досягненню не лише технічних, але й соціальних та екологічних ефектів, включаючи зниження

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

викидів парникових газів, покращення мікроклімату будівель і підвищення рівня комфорту користувачів.

Оцінювання сукупної енергетичної ефективності країни є методично складним завданням, оскільки вимагає врахування як технічних характеристик об'єктів, так і макроекономічних показників. У випадках, коли кількісна оцінка є утрудненою, доцільним є застосування якісних або інтегрованих індикаторів. Одним із таких є відношення сумарного питомого споживання первинної енергії на одну особу до показника внутрішнього валового продукту на душу населення.

1.2.1. Порівняльний аналіз енергоємності та перспективи сталого розвитку сектору теплопостачання.

Графічні дані (рис. 1 та рис. 2) демонструють зміни питомого споживання первинної енергії та величини ВВП на одну особу протягом певного ретроспективного періоду. Порівняння цих показників дозволяє сформулювати інтегральну якісну оцінку ефективності використання енергетичних ресурсів країною. Узагальнені результати порівняння України з окремими європейськими державами наведено на рис. 3. Відповідно до наведених даних, в Україні у 2021 році показник питомої енергоємності становив **2,17 кВт·год/\$ ВВП**, що на **57% перевищує середній показник країн ЄС** та на **64% більший, ніж відповідне значення у Великобританії**.

Подібний розрив свідчить про значний потенціал удосконалення систем енергопостачання, у тому числі в частині теплопостачання. Це також обґрунтовує доцільність впровадження широкого спектра заходів: від модернізації джерел тепла та теплових мереж до впровадження цифрових систем управління, автоматизації розрахунків і програмних рішень для аналізу та оптимізації функціонування системи.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підвищення енергоефективності у секторі будівництва та теплопостачання є важливою умовою для сталого розвитку, посилення енергетичної безпеки та зменшення залежності країни від зовнішніх енергоресурсів.

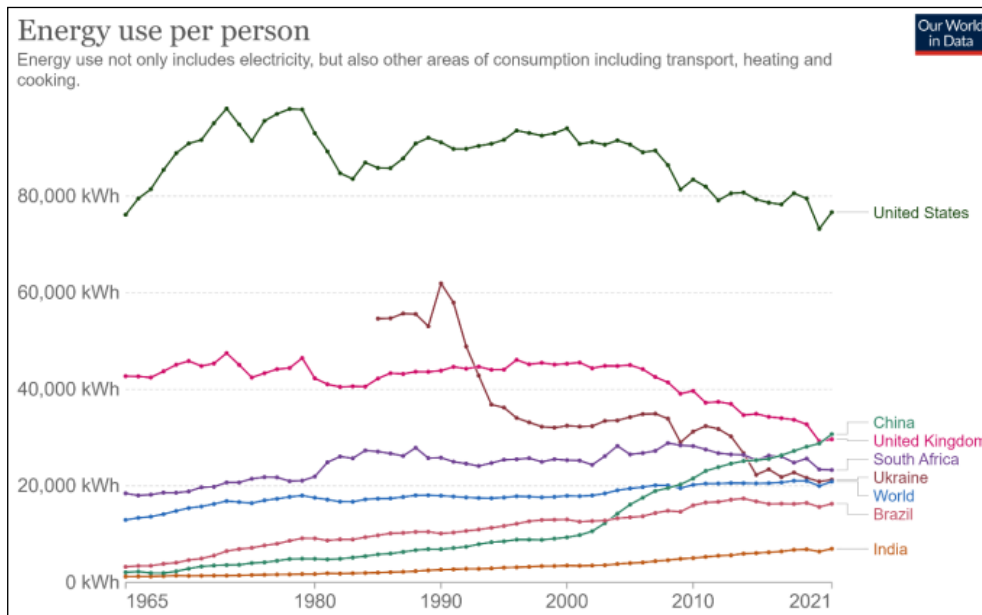


Рис. 1.1. Ретроспектива сумарного споживання первинної енергії за всіма видами палива в розрізі країн світу, кВт*год/люд [5]

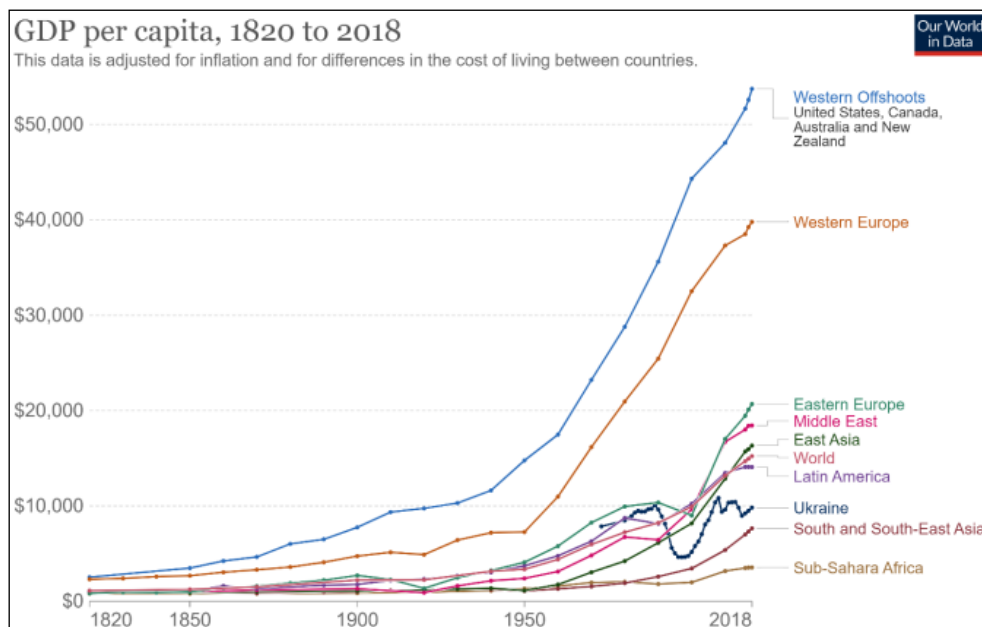


Рис. 1.2. Ретроспектива зміни показника внутрішнього валового продукту в розрізі країн світу, \$/люд [5]

З показників рис. 1 та рис. 2 можна сформувати умовний якісний показник потенціалу запровадження підходів сталого будівництва та комплексу заходів з енергоефективності. На гістограмі (рис. 3) наведені такі показники за 2021 рік для певних країн. Показник, характерний для України становить 2,17 кВт*год/\$ ВВП, що на 57% більше ніж показник країн ЄС та на 64% більше за показник Великобританії. Отриманий результат свідчить про наявність високого потенціалу до впровадження заходів з енергозбереження та комплексних заходів зі сталого розвитку, в тому числі в будівельній галузі України.

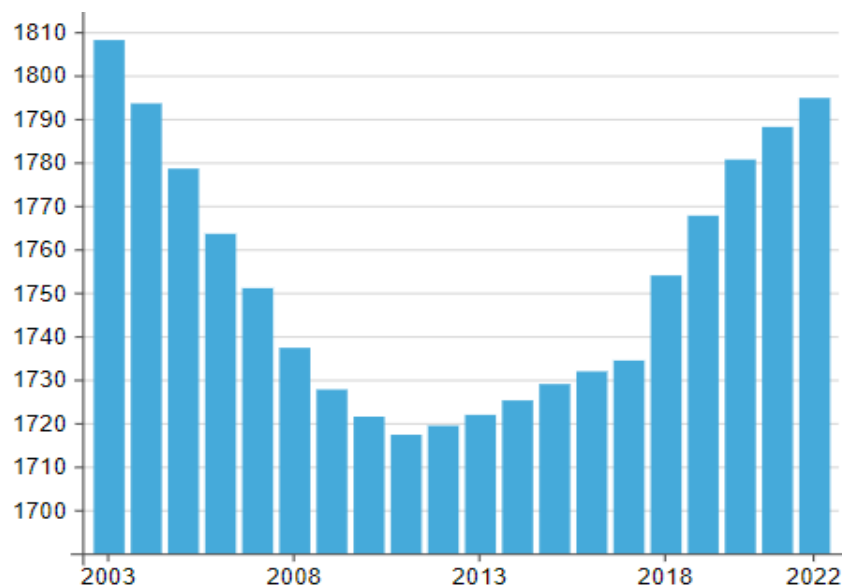


Рис. 1.3. Відношення питомого споживання енергії до показника внутрішнього валового продукту, кВт*год/\$

Характерними особливостями Києва та Київської області України є стрімкий, у тому числі технологічний, розвиток протягом останніх років, які очевидно набули регресійних властивостей після початку російської агресії 24 лютого 2022 року. Населення регіону (графік зміни кількості населення Київської області показаний на рис. 4) стрімко зростало, починаючи з 2012 року [6]. Таке зростання було зумовлене розширенням житлової забудови навколо столиці, активною міграцією населення із

інших областей та розвитком передмість як економічно привабливих зон.

Збільшення чисельності населення, у свою чергу, створювало додаткове навантаження на інженерну інфраструктуру, зокрема на системи теплопостачання, водопостачання та електропостачання. До початку повномасштабної агресії регіон демонстрував тенденцію до модернізації комунальних мереж та підвищення їх енергоефективності, що відповідало загальним національним цілям сталого розвитку. Однак події 2022 року суттєво змінили динаміку інфраструктурного розвитку, спричинивши пошкодження критичних об'єктів і тимчасове зниження темпів технологічного оновлення.

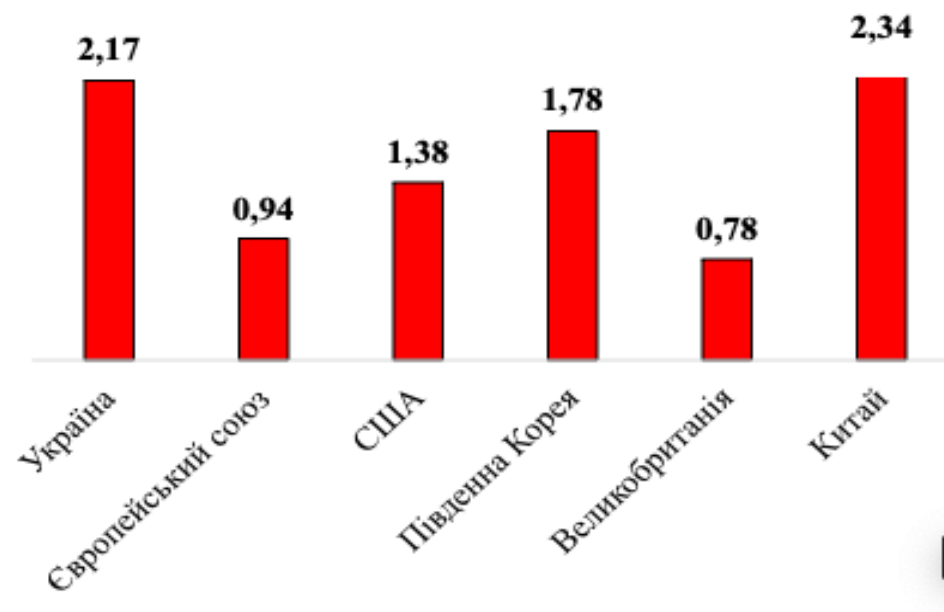


Рис. 1.4. Зміна населення (тис. люд) Київської області за період 2003-2022 роки [6]

Це водночас зумовило стрімкий ріст і будівельної галузі, зокрема в частині будівництва багатоквартирних та індивідуальних житлових будинків. В свою чергу зростання населення потребує нового будівництва, реконструкції та/або капітального ремонту існуючих будівель та споруд соціальної сфери та об'єктів енергетики [7].

Економічне зростання в поєднанні зі сталим соціальним та екологічним ефектом можливі в тому числі при оптимальному розвитку

будівельної галузі країни, яка тісно пов'язана з енергетичним сектором та сектором виробництва будівельних матеріалів [8, 9].

1.2.2. Нормативи енергоефективності будівель: проблеми впровадження та фінансові стимули.

Енергоефективність будівель є одним із ключових чинників раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів та зменшення навантаження на енергетичну інфраструктуру держави. Значна частина житлового і громадського фонду України була споруджена за застарілими нормами, що призводить до надмірних витрат енергії та низької ефективності її використання. В умовах адаптації національних нормативів до європейських стандартів посилюється потреба в удосконаленні регуляторної бази, а також у формуванні практичних підходів для оцінювання та підвищення енергоефективності будівель.

Будівельні енергетичні норми — або ж «енергетичні стандарти будівель», «теплотехнічні норми» та «норми енергоефективності» — є основним інструментом державного регулювання, що спрямований на зменшення впливу будівельного сектора на енергетичну систему та навколишнє середовище, одночасно забезпечуючи комфортні умови проживання [10].

З метою обміну міжнародним досвідом у сфері енергоефективності проведено дослідження [11], у якому проаналізовано чинні стандарти енергоефективності в країнах ЄЕК ООН. Оцінювання здійснювалося за низкою критеріїв, зокрема: обов'язковість виконання вимог, технічний зміст нормативів, механізми контролю та наявність стимулів. Україна отримала найнижчу оцінку за останнім критерієм через відсутність державних фінансових інструментів, які б заохочували впровадження енергоефективних заходів і відновлюваних джерел енергії, на відміну від більшості країн ЄС. Найактивніше підтримує такі ініціативи Франція, де

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

суттєво стимулюють проекти, що перевищують обов'язкові нормативні вимоги.

У роботі [12] подано аналіз будівельних енергетичних стандартів і систем сертифікації у країнах ЄС. Особлива увага приділяється жорсткості нормативних вимог, мінімальним технічним показникам, а також процесам моніторингу та сертифікації будівель. Порівняння здійснювалося на прикладі трьох країн — Швеції, Німеччини та Іспанії, що належать до «холодної», «помірної» та «теплої» кліматичних зон відповідно. Інтерес до шведських та німецьких стандартів пояснюється близькими значеннями градусо-діб у цих країнах та в багатьох регіонах України [13].

Шведські будівельні норми Boverket's Building Regulations (BBR) визначають вимоги до енергоефективності переважно на основі вимірних обсягів енергоспоживання для опалення, охолодження, гарячого водопостачання та функціонування допоміжних систем будівлі, за винятком побутових приладів.

Основний показник — питома придбана енергія (kWh/m^2), яка відображає кількість енергії, що фактично надходить до інженерних систем будівлі й оплачується власником. Важливою особливістю BBR є те, що відповідність вимогам визначається виключно за цим інтегральним показником: якщо він у межах нормативу, перевірка окремих параметрів не є обов'язковою. Це дає змогу власникам обирати оптимальні шляхи досягнення енергоефективності, хоча мінімальні рекомендації щодо теплотехнічних параметрів огорожувальних конструкцій та герметичності все ж існують. Остаточна оцінка виконується шляхом вимірювання фактичного енергоспоживання після введення будівлі в експлуатацію.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У Німеччині діє норматив EnEv, за яким мінімальні вимоги визначаються через порівняння енергетичних показників реальної будівлі з показниками еталонного об'єкта.

Нові будівлі мають передбачати використання відновлюваних джерел енергії, а вироблена на місці енергія віднімається від загальної потреби у кінцевій енергії. Мінімальні частки покриття потреби енергії залежать від джерела: не менше 50% для геотермальних систем та не менше 15% — для сонячних. Якщо ж ці вимоги неможливо виконати, допускаються альтернативні рішення, визначені нормативом.

У країнах ЄС оцінювання енергоефективності здійснюється або на основі розрахункових показників, або за фактичними даними енергоспоживання. Серед 27 країн ЄС чотирнадцять застосовують лише розрахункову методологію. В інших державах використовують змішаний підхід, який залежить від типу або віку будівель. Наприклад, у Словенії фактичні вимірювання застосовуються тільки для нежитлових будівель, тоді як в Естонії та Латвії — для всіх наявних і новозведених будівель. У

Швеції попередній розрахунковий аналіз виконується до початку будівництва, а після завершення обов'язково видається сертифікат, сформований на основі реальних енергетичних даних.

Основними завданнями дослідження є аналіз чинних українських вимог до енергоефективності будівель, зіставлення їх з міжнародними підходами, виявлення слабких сторін наявної нормативної бази та формування напрямів для її вдосконалення. Для оцінки відмінностей між вимогами до максимальних коефіцієнтів теплопередачі огорожувальних конструкцій і максимально дозволеними питомими показниками енергоспоживання житлових будівель у ДБН В.2.6-31:2021 та німецьких, шведських і польських стандартах було проведено відповідне порівняння, результати якого наведено в таблицях 1–2.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Значення коефіцієнтів теплопередачі в нормативах України та Швеції залежать від температурної зони, тому в таблиці вказані діапазони між мінімальним та максимальним значеннями. У стандартах Німеччини та Польщі у свою чергу немає розділення на температурні зони.

Таблиця 1.1. Порівняння вимог до коефіцієнта теплопередачі огорожень стандартів енергоефективності різних країн

Тип огороження	Коефіцієнт теплопередачі, Вт/м ² *К			
	Україна	Німеччина	Швеція	Польща
Зовнішні стіни	0,25–0,28	0,28	0,1–0,18	0,2
Дах	0,14–0,16	0,2	0,08–0,13	0,15
Вікна	1,11–1,43	1,3	1,1–1,3	0,9
Двері	1,43–1,66	1,8	–	1,3

Таблиця 1.2. Порівняння показників питомого енергоспоживання житловими будівлями між різними стандартами енергоефективності

Тип житлового будинку	Максимальний питомий показник енергоспоживання, кВт*год/м ²		
	Україна	Швеція	Польща
Індивідуальний	110–120	80–130	105
Багатоквартирний	65–85	75–115	95

З порівняльних таблиць видно, що вимоги до максимального коефіцієнту теплопередачі українського ДБН В.2.6-31:2021 є досить близькими до вимог німецького та польського нормативів.

Вимоги українського нормативу до коефіцієнтів теплопередачі покриття та дверей виявились навіть більш суворими в порівнянні з німецьким нормативом. Але вимоги до коефіцієнтів теплопередачі покриття та стін шведського нормативу та вимоги до вікон польського

виявились найбільшими поміж усіх. Щодо показників питомого максимального енергоспоживання будівель можна зробити висновок, що вимоги українського нормативу є більш суворим по відношенні до багатопверхових житлових будинків та м'якшими по відношенню до односімейних будинків у порівнянні з нормативами Швеції та Польщі.

1.2.3. Основні напрями сталого розвитку в будівництві та просторовому плануванні України.

Загалом сталий розвиток в будівництві, архітектурі та просторовому плануванні можна умовно розділити на такі групи напрямків з характерними саме Україні особливостями:

1. Розробка планів дій сталого розвитку та їх впровадження. Будь-яка система, в тому числі і будівельна галузь, є ієрархічно побудованою з необхідністю застосування комплексних підходів щодо генерального планування з урахуванням промислового розвитку регіонів та наявності вторинних енергетичних ресурсів.
2. Архітектура зеленого відновлення та сучасного будівництва. Значна кількість застарілих та з перевищеними термінами експлуатації будівель та споруд, а наразі додатково і значна кількість об'єктів, що потребують відновлення після бойових дій, формує необхідний тренд розвитку будівельної галузі для окремих будівель та комплексів об'єктів.
3. Оптимізаційне конструювання будівель цивільного призначення та об'єктів інфраструктури. Одним з базових та основних чинників, що формують енергоспоживання будівель, є власне архітектурно-енергетична оболонка, оптимізація якої повинна відбуватися комплексно за напрямком архітектурної геометрії, конструктивних рішень та теплотехнічних показників.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Енергоефективне проектування інженерних систем при відновленні та новому будівництві. Інженерні мережі, як і оболонка будівлі, визначають не лише рівень енергоспоживання будівлі, а й рівень показників мікрокліматичного комфорту.
5. Доступність та безпека у будівництві і архітектурі. Не варто забувати, що на рівні з економічними та енергетичними показниками, значущу роль відіграють і соціальні ефекти будівництва, особливо для вразливих груп населення.

Досяжність цілей сталого розвитку в будівництві, архітектурі та сталому плануванні в першу чергу залежить від навичок та вмінь майбутнього покоління спеціалістів в галузі. Тому вкрай актуальним є підготовка за сучасними та саме комплексними підходами значного та якісного масиву спеціалістів-будівельників, основною метою роботи яких буде створення будівель та споруд, що можуть забезпечити сталий та водночас ефективний розвиток країни.

1.2.4. Загальні висновки та узагальнення результатів

В цілому в Україні функціонує достатньо насичений та жорсткий комплекс вимог щодо енергоефективності будівель і споруд. Є недоцільним збільшувати кількісні вимоги щодо ключових параметрів на кшталт приведенного опору теплопередачі та енергоспоживання. Загалом законодавство України в секторі Енергоефективності за останні 5-10 років сягнуло далеко вперед та стало більш дотичним по відношенню до європейських підходів.

Клас енергетичної ефективності будівель і споруд при новому будівництві та реконструкції присвоюється на етапі виконання затверджувальної стадії проектних робіт. Присвоєння класу відбувається за результатами розрахунків енергетичного сертифікату, який

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

завантажується в ЄДЕССБ паралельно з завантаженням затверджувальної стадії проектно-кошторисної документації. Таким чином, енергетичний сертифікат в первинній своїй формі є результатом аналізу проектною документації і відношення до моніторингових експлуатаційних показників об'єкту не має (при цьому практика експлуатації, яка склалася в Україні, при повторній сертифікації об'єкту дасть розбіжність з проектним сертифікатом в «кращу» сторону, що буде свідчити лише про «неексплуатацію» частини інженерних систем).

Клас енергетичної ефективності присвоюється в залежності від відсоткового відхилення показника енергоспоживання від мінімально встановлених вимог (встановлених для класу С). При цьому мінімально встановлені вимоги до енергоспоживання і є фактично первинним абсолютним фактором, що в подальшому визначить клас. Вбачається, що мінімально встановлені вимоги до різних типів будівель повинні бути відкориговані.

Існує три базових «енергетичних» терміни: енергопотреба, енергоспоживання (на нього зараз і орієнтуються при присвоєнні класу), первинна енергія. Доцільно прискорити перехід на нормування по первинній енергії (адже номінально саме первинна енергія відображає суть використання енергії глобально, тобто з урахуванням чинників і економіки, і екології).

Чисельні показники енергоспоживання та первинної енергії (маються на увазі мінімальні вимоги) для кожної країни будуть індивідуальними, оскільки опираються в основі на кліматичні показники (це ремарка до того, що очікувати близькі значення енергоспоживання/первинної енергії для України та Іспанії не варто). Для інвестора-нерезидента доцільно паралельно з діючим українськими вимогами законодавства в секторі енергоефективності (та/або):

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- дозволити зобов'язати підрядні організації розраховувати «інший» клас енергетичної ефективності, пов'язаний з первинною енергією (а не з енергоспоживанням);
- ввести механізм моніторингу об'єктів, споруджених за гроші, призначені на «відновлення/модернізацію» України (мається на увазі більш дієвий механізм, аніж моніторинг раз у десять років);
- ввести механізм дотацій/знижок на енергоносії для об'єктів клас енергетичної ефективності яких підтверджений моніторингом (при цьому якимось чином потрібно контролювати задіяність при експлуатації всіх запроєктованих інженерних систем);
- визначити вимоги та запустити в Україні сертифікацію будівель на кшталт: пасивних, NZEB (та інших зі схожими «трендовими» назвами).

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ №2

“Теоретичні основи оптимізації мереж тепlopостачання”

Консультант: Доктор Технічних наук Скочко В.І.

(Підпис)

(Дата)

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оптимізація мереж теплопостачання є ключовою складовою підвищення енергоефективності, зниження експлуатаційних витрат та скорочення екологічного навантаження в енергетичних системах. Теоретичні основи цього напрямку поєднують математичне моделювання теплових і гідравлічних процесів, економічну оцінку режимів роботи джерел та врахування технічних обмежень мережі. Центральне місце в теорії займає формулювання цільової функції та системи обмежень, що дозволяють однозначно визначити критерій оптимальності й клас допустимих рішень.

Для розв'язання таких задач використовують як класичні аналітичні підходи, так і чисельні методи — від математичної програмування до еволюційних та гібридних алгоритмів. Теоретичні моделі закладають основу для створення програмних інструментів, які забезпечують практичну реалізацію оптимізаційних процедур і верифікацію отриманих рішень.

У рамках цього диплому теоретична частина слугує підґрунтям для програмної реалізації методу мінімізації відношення витрат первинної енергії до сумарної встановленої потужності споживачів і для подальшої валідації результатів.

2.1. Структура систем теплопостачання та фактори, що впливають на їх енергоефективність.

Системи теплопостачання є фундаментально важливою частиною енергетичної інфраструктури, особливо в умовах кліматичних регіонів із тривалим опалювальним сезоном. Вони забезпечують комфорт у житлових будинках, стабільну роботу промислових підприємств, навчальних закладів та інших об'єктів інфраструктури. Створення ефективної системи теплопостачання — це складний інженерний процес, який охоплює проектування, моделювання, налагодження та оптимізацію її компонентів.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Її структура визначає не лише технічну надійність, а й загальний рівень енергоефективності, тобто кількість первинної енергії, що потрібна для забезпечення потреб споживачів у теплі. У сучасних умовах, коли актуальними є питання енергозбереження та зменшення навантаження на енергетичні ресурси, розуміння принципів роботи систем теплопостачання стає особливо важливим.

2.1.1. Джерела теплової енергії як ключовий елемент структури.

Найпершим і найважливішим компонентом системи є джерело теплової енергії. Саме воно визначає ефективність усього ланцюга теплопостачання, адже від того, як саме виробляється тепла енергія, залежить величина витрат первинної енергії, економічні показники системи й рівень екологічного впливу. Джерела тепла можуть бути централізованими — котельні, теплоелектроцентралі, когенераційні установки — або децентралізованими — індивідуальні котли, теплові насоси чи малі модульні установки. Кожен тип джерела має свої переваги й недоліки, що впливають на енергоефективність у масштабі всієї системи. Наприклад, ТЕЦ забезпечують високий рівень утилізації первинної енергії завдяки когенерації, тоді як традиційні котельні простіші в експлуатації, але мають нижчий ККД, особливо при часткових навантаженнях.

Ключову роль відіграє також паливний баланс. Використання природного газу, вугілля, біомаси або електроенергії має різний коефіцієнт первинної енергії, що визначає реальні енергетичні витрати. Наприклад, системи, що працюють на газі, можуть бути ефективнішими за ті, що використовують електронагрівачі, якщо електроенергія виробляється з великими втратами у генерації. Це показує, наскільки важливо враховувати не лише безпосередні витрати на джерелі, а й повний енергетичний шлях.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ще одним фактором є технічний стан джерела. Застаріле обладнання, відсутність систем автоматичного регулювання, некоректне налаштування пальників чи використання низькоякісного палива може суттєво збільшувати витрати енергії. Тому модернізація генеруючих потужностей — заміна пальникового обладнання, встановлення частотно-регульованих приводів, впровадження систем моніторингу — є важливим кроком до підвищення енергоефективності всієї системи.

2.1.2. Мережева інфраструктура як транспортний компонент системи тепlopостачання.

Не менш важливою складовою структури тепlopостачання є мережа трубопроводів, що транспортує теплоносії до споживачів. У класичних централізованих системах це, як правило, вода або перегріта вода, рідше — пар. Якість та ефективність транспортування тепла залежить від довжини мережі, типу трубопроводів, рівня їхньої ізоляції, стану трасування, робочих температур, а також гідравлічного режиму.

Найбільшою проблемою теплових мереж є **теплові втрати**, які в старих мережах можуть сягати 20–30% і навіть більше. Втрати виникають через неякісну або зношену ізоляцію, корозію труб, втрати через компенсатори, незадовільний стан камер та каналів. Сучасні попередньо ізольовані труби істотно зменшують ці втрати, однак повна модернізація мереж потребує значних інвестицій.

Важливим аспектом є й **гідравлічна ефективність**. Насоси, що забезпечують циркуляцію теплоносія, споживають електроенергію, і не оптимальна їхня робота може збільшувати витрати енергії системи. Застосування частотно-регульованих приводів, автоматизованих систем управління тиском та витратою, оптимізація температурних графіків — усе це суттєво зменшує як теплові, так і електричні втрати.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Не варто забувати про **температурні режими**: надмірно високі температури у подачі спричиняють збільшені втрати, а занадто низькі можуть не забезпечити комфорт споживачів. Тому поширюються так звані «низькотемпературні» системи (наприклад, 4-го покоління), які мають значно вищий потенціал енергоефективності.

2.1.3. Споживачі теплової енергії і їх вплив на енергетичну ефективність системи.

Споживачі формують теплове навантаження, яке необхідно забезпечити джерелам і мережам. Чим точніше система відповідає реальному профілю навантажень, тим ефективніше вона працює. Одним із найбільших викликів є **нерівномірність теплового навантаження**, яка може змінюватися протягом доби, тижня чи сезону. У періоди малих навантажень система змушена працювати з надлишковою потужністю, що призводить до зниження ефективності джерел та збільшення питомих втрат. Наприклад, котли мають мінімально допустиме навантаження, нижче якого вони працюють у неефективному режимі.

Важливу роль відіграє також рівень термомодернізації будівель: утеплення фасадів, заміна вікон, встановлення індивідуальних теплових пунктів дозволяє зменшити теплові потреби й, відповідно, навантаження на всю систему. Елементарне встановлення терморегуляторів на радіатори дозволяє знизити споживання тепла на 15–20%. Окрім того, сучасні індивідуальні теплові пункти з погодозалежним керуванням автоматично регулюють подачу тепла залежно від зовнішньої температури, підвищуючи ефективність системи.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.1.4. Взаємозв'язок компонентів і комплексний підхід до оптимізації.

Енергоефективність системи тепlopостачання визначається не окремими характеристиками джерел, мереж чи споживачів, а їх взаємодією. Наприклад, модернізація будівель може призвести до зниження теплового навантаження настільки, що джерело тепла працюватиме у надмірно неефективному режимі, якщо не виконати гідравлічну оптимізацію мережі чи не скоригувати схеми генерації. У свою чергу, модернізація мережі без оптимізації джерел може зменшити втрати, але не знизити витрат палива, бо джерело все одно працює при надлишковій потужності.

Саме тому сучасні підходи до оптимізації включають комплексний аналіз усіх компонентів, побудову математичних моделей і розвиток цифрових систем моніторингу, які дають змогу відслідковувати реальний стан мережі, навантаження споживачів і режими роботи обладнання. Поєднання таких моделей із програмними методами оптимізації дозволяє знайти найбільш ефективні режими роботи системи у різні часові періоди.

2.1.5. Зовнішні та технологічні фактори.

На енергоефективність систем тепlopостачання впливають і зовнішні фактори: клімат, температура зовнішнього середовища, тривалість опалювального сезону, тип палива, рівень автоматизації та навіть тарифна політика. Економічні стимули можуть сприяти переходу на більш ефективні види палива або впровадженню сучасних технологій, таких як теплові насоси, сонячні колектори чи системи з утилізацією вторинного тепла підприємств.

Значну роль відіграє цифровізація: системи диспетчеризації дозволяють оперативно реагувати на зміни навантаження, а алгоритми оптимізації — налаштовувати роботу обладнання відповідно до поточного

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

попиту. У перспективі такі системи можуть повністю автоматизувати роботу тепломережі, забезпечуючи оптимальний режим з мінімальними витратами енергії.

2.2. Показники енергоефективності та методика оцінки первинної енергії.

Системи теплопостачання оцінюють не лише за технічною надійністю, а й за тим, наскільки ефективно вони використовують енергетичні ресурси. Для цього застосовуються різноманітні показники енергоефективності, які дають можливість кількісно виміряти витрати енергії та порівняти альтернативні рішення. Однією з ключових метрик у таких оцінках є **витрати первинної енергії** — уніфікований показник, що дозволяє зіставляти різні джерела і технології з точки зору загальних енергетичних витрат на виробництво, передачу й споживання тепла. Підхід до визначення показників і методика перерахунку у первинну енергію мають чітку методологічну основу та потребують системного збору даних, коректних коефіцієнтів перетворення і урахування специфіки когенерації, втрат та часової структури навантажень.

2.2.1. Основні показники енергоефективності.

До ключових показників, що застосовуються у сфері теплопостачання, належать:

- **Загальне споживання первинної енергії** — сумарні витрати первинних енергоресурсів, пов'язані з виробництвом і постачанням тепла;
- **Питоме споживання первинної енергії** (наприклад, на одиницю опалювальної площі). **Коефіцієнт корисної дії системи (system efficiency)** — відношення корисно переданої теплової енергії до витрат первинної/кінцевої енергії;

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- **Питомі теплові втрати мережі** (Вт/м або % від переданої енергії);
- **Ексергійні показники** (для детальної оцінки якісної складової енергії).

Ці індикатори дозволяють оцінити як абсолютні витрати, так і ефект від модернізаційних заходів, порівнювати варіанти джерел і схем постачання.

2.2.2. Поняття первинної енергії та її фактори перерахунку.

Первинна енергія — це енергія, яка міститься в природних енергетичних ресурсах до їхньої переробки або трансформації (видобуток, розвідка, первинна генерація). Оцінка первинної енергії для кінцевих споживаних видів енергії (тепло, електроенергія, паливо) здійснюється шляхом множення обсягів кінцевої енергії на **коефіцієнти первинної енергії (primary energy factors, PF)**, що відображають втрати на генерацію, трансформацію й передачу. У загальному вигляді:

$$E_{\text{prim}} = \sum_i E_{\text{final},i} \cdot PF_i \quad (2.1)$$

Обсяг кінцевої енергії і-го виду. Для палива, що спалюється безпосередньо, PF часто дорівнює одиниці або включає фактори видобутку й транспортування; для електроенергії PF зазвичай значно більший за 1 і залежить від паливної структури та ефективності генерації у конкретній енергосистемі. Важливо: стандартні PF відрізняються по країнах і за джерелами (національні методики, ДСТУ/EN/ISO), тому вибір джерела PF повинен бути обґрунтований.

2.2.3. Методика оцінки первинної енергії для теплопостачальних систем.

Практична методика оцінки первинної енергії складається з кількох послідовних кроків:

- a) Вбір вихідних даних — баланс споживання теплової енергії по джерелах, обсяги використаних палив, вироблена електроенергія, гідравлічні втрати, сезонні графіки;
- b) Визначення корекцій для систем з когенерацією (ТЕЦ/КП) — застосовується або «фізичний» підхід (враховуються реальні паливні витрати та корисні виходи), або «субституційний» (заміщення умовної централізованої генерації електроенергії, що створює електрорушійний кредит); вибір методу впливає на кінцевий результат;
- c) Застосування коефіцієнтів PF для кожного носія і для електроенергії (за часовими інтервалами, якщо доступні дані по місячних/добових PF або за типовими значеннями);
- d) Урахування втрат при передачі й розподілі (як теплових, так і електричних) — втрати у мережі перераховуються у додаткову первинну енергію;
- e) Нормалізація результатів по погодним умовам (наприклад, приведення до еталонних Градусо-Днів опалення — HDD) для порівняння різних періодів або регіонів;
- f) Аналіз чутливості: розрахунок впливу невизначеності PF, ККД обладнання та втрат мережі на значення.

У математичній формі для системи з кількома носіями найчастіше використовують вираз:

$$E_{\text{prim}} = \sum_{\text{fuel}} Q_{\text{fuel}} + PF_{\text{fuel}} + E_{\text{el}} \cdot PF_{\text{el}} + E_{\text{losses}} \cdot PF_{\text{loss}} \quad (2.2.)$$

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де, Q_{fuel} – витрати палива (в енергетичних одиницях), E_{el} — спожита електроенергія системою
 E_{losses} – втрати у мережі (підсумовано).

2.2.4. Особливості оцінки для когенераційних і гібридних рішень, стандарти та практичні підходи.

Оцінка первинної енергії для систем, що поєднують виробництво тепла й електрики (cogeneration), є складнішою через необхідність коректного розподілу паливного внеску між теплом і електрикою. Існують два основних підходи: фізичний (based on actual fuel consumption and split by exergy or energy) та субституційний (зіставлення з умовною роздільною генерацією). Різні стандарти (європейські, національні) рекомендують конкретні процедури та коефіцієнти; тому у дипломних і проектних розрахунках важливо вказувати застосовані стандарти й джерела PF.

Практично часто застосовують таблиці PF для типових видів палива та середніх значень PF для електроенергії регіональної мережі — але для детальних оптимізаційних задач краще використовувати часові або сезонні PF, що враховують зміну структури генерації й навантаження.

2.2.5. Особливості оцінки для когенераційних і гібридних рішень, стандарти та практичні підходи.

Оцінка первинної енергії для систем, що поєднують виробництво тепла й електрики (cogeneration), є складнішою через необхідність коректного розподілу паливного внеску між теплом і електрикою. Існують два основних підходи: фізичний (based on actual fuel consumption and split by exergy or energy) та субституційний (зіставлення з умовною роздільною генерацією). Різні стандарти (європейські, національні) рекомендують конкретні процедури та коефіцієнти; тому у дипломних і проектних розрахунках важливо вказувати застосовані стандарти й джерела PF.

Практично часто застосовують таблиці PF для типових видів палива

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та середніх значень PF для електроенергії регіональної мережі — але для детальних оптимізаційних задач краще використовувати часові або сезонні PF, що враховують зміну структури генерації й навантаження.

2.2.6. Аналіз невизначеності, валідація даних та використання в оптимізації.

Методика оцінки первинної енергії чутлива до достовірності вихідних даних (реєстри споживання, показники ККД, втрати мережі) та до вибору PF. Тому робота повинна включати валідацію введених даних (порівняння з фактичними показниками в періоди пік/провал), аналіз чутливості (визначення, які параметри мають найбільший вплив на результат) і, за потреби, побудову сценаріїв (базовий, оптимістичний, песимістичний). Для програмної реалізації ці розрахунки найчастіше інтегрують у модулі, що автоматично підтягують PF, виконують погодну нормалізацію, обчислюють по часовим інтервалам і надають вихідні таблиці та графіки для подальшої оптимізації.

2.3. Математичні моделі компонентів мережі та їх зв'язок у загальній моделі.

2.3.1. Роль математичного моделювання у системах теплопостачання.

Математичне моделювання є фундаментальним інструментом сучасного аналізу та управління системами теплопостачання. Воно дозволяє формалізувати процеси виробництва, транспортування та споживання теплової енергії, що є необхідною умовою для оптимізації енергоспоживання та підвищення ефективності роботи всієї системи.

Використання математичних моделей забезпечує можливість прогнозування поведінки системи при різних режимах роботи, визначення оптимальних параметрів обладнання та оцінки енергетичних витрат. Це

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

особливо важливо в умовах зміни навантаження протягом доби, тижня або сезону, коли ефективність роботи джерел тепла та мережевих елементів безпосередньо впливає на загальні витрати первинної енергії.

Моделювання дозволяє враховувати як динамічні процеси, так і сезонні коливання, а також прогнозувати вплив зовнішніх факторів, таких як температура зовнішнього повітря, теплові характеристики будівель та поведінку споживачів. Завдяки цьому можна не лише аналізувати роботу існуючої системи, а й планувати модернізацію або реконструкцію мережі, оптимізувати режими роботи обладнання та підбирати найбільш ефективні джерела теплової енергії. Математичні моделі створюють основу для розробки цифрових систем управління та програмного забезпечення для автоматизації тепlopостачання.

2.3.2. Моделювання основних компонентів системи.

Математичні моделі джерел тепла, мережевих елементів та споживачів утворюють основний каркас загальної моделі системи тепlopостачання. Джерела тепла, такі як котельні, теплоелектроцентралі, когенераційні установки або теплові насоси, є головними виробниками енергії. Моделі джерел дозволяють враховувати витрати первинного палива, теплову потужність, ефективність обладнання при часткових та повних навантаженнях, температурні режими подачі та повернення теплоносія, а також алгоритми автоматичного управління. Для когенераційних установок моделювання включає взаємозв'язок між виробництвом тепла та електроенергії, що дозволяє визначити оптимальні режими роботи для мінімізації втрат енергії та витрат палива.

Мережеві елементи включають трубопроводи, насосні станції, теплообмінники та розподільні камери, які забезпечують транспортування теплової енергії від джерел до споживачів. Математичні моделі мереж враховують гідравлічні параметри, теплові втрати, зміну температури

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

теплоносія та час його транспортування. Для великих систем застосовуються спрощені моделі, що дозволяють агрегувати ділянки трубопроводів або насосні групи, зменшуючи обчислювальні витрати, але зберігаючи реалістичність поведінки мережі. Важливим аспектом є моделювання насосного обладнання, включно з характеристиками насосів та їхніми кривими продуктивності, що дозволяє врахувати споживання електроенергії та оптимізувати гідравлічні режими.

Моделі споживачів і індивідуальних теплових пунктів відображають профілі навантаження, теплові втрати будівель, динаміку гарячого водопостачання та алгоритми регулювання. Інтеграція ІТП забезпечує погодозалежне управління, яке дозволяє автоматично підлаштовувати подачу тепла відповідно до зовнішніх умов та потреб споживачів. Це знижує питомі витрати енергії та підвищує загальну ефективність системи.

2.3.3. Інтеграція компонентів у загальну модель та практичне застосування.

Загальна модель системи теплопостачання формується шляхом інтеграції моделей джерел тепла, мережевих елементів та споживачів у єдину структуру. Вузли моделі відповідають джерелам, споживачам та розподільним камерам, а гілки — трубопроводам, насосним станціям та теплообмінникам. Взаємодія компонентів описується системою рівнянь, що включає баланси маси та енергії, теплові та гідравлічні обмеження, режими роботи обладнання та втрати в мережі. Для розв'язання таких систем застосовуються чисельні методи та ітераційні алгоритми, що дозволяють враховувати як швидкі, так і повільні процеси, включно зі змінами добового та сезонного навантаження.

Математичне моделювання дозволяє виявляти вузькі місця в роботі системи, оцінювати потенціал модернізації обладнання, планувати реконструкцію мереж та оптимізувати режими роботи джерел тепла. На

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

основі моделей можна прогнозувати економію палива, оцінювати вплив модернізації ІТП, низькотемпературних систем та сучасних теплоізоляційних рішень. Використання загальної інтегрованої моделі є необхідною умовою для розробки цифрових систем управління та програмного забезпечення для оптимізації теплопостачання.

Таблиця 2.1. Узагальнені основні компоненти системи та їхні моделі.

Компонент	Тип моделі	Основні вхідні дані	Основні виходи	Типові спрощення
Джерело тепла (котельня, ТЕЦ, тепловий насос)	Динамічна/емпірична	Паливо, режим роботи, ККД	Потужність, витрати палива, температури	Фіксований ККД, агрегування обладнання
Насоси та насосні станції	Характеристики + баланс тисків	Крива насоса, витрати	Напір, електроспоживання	Ігнорування динаміки
Трубопровід	Характеристики + баланс тисків	Довжина, діаметр, ізоляція	Напір, електроспоживання	Модель «зосередженої ємності»
Споживач / ІТП	Характеристики + баланс тисків	Теплові втрати, зовнішня температура	Тепловий попит, витрати	Спрощені графіки навантажень

Таким чином, комплексне моделювання компонентів та їх інтеграція у загальну модель дозволяє створити достовірне представлення роботи системи теплопостачання, оцінити ефективність різних сценаріїв

управління, підвищити енергоефективність та забезпечити основу для впровадження програмного забезпечення для оптимізації роботи мережі.

2.4. Теоретичні основи побудови оптимізаційних алгоритмів для теплових мереж.

Оптимізація теплових мереж є ключовим напрямом сучасної енергетичної інженерії, оскільки дозволяє підвищити ефективність розподілу теплової енергії, зменшити втрати, оптимізувати режими роботи обладнання та інтегрувати відновлювані джерела тепла. Математичні моделі та оптимізаційні алгоритми забезпечують можливість прийняття раціональних рішень у складних багатofакторних умовах роботи теплових систем.

2.4.1. Структура та особливості функціонування теплових мереж.

Теплова мережа — це розгалужена система трубопроводів, яка забезпечує транспортування теплоти від джерела (котельні, ТЕЦ, теплових насосів) до споживачів. Ефективне функціонування теплової мережі визначається низкою факторів:

- температурними режимами подачі та звороту;
- витратами теплоносія;
- гідравлічними властивостями трубопроводів;
- станом насосного обладнання;
- тепловими втратами на шляху транспортування.

Для опису цих процесів використовують рівняння теплопередачі, гідравлічні рівняння та балансні залежності, які формують базу для побудови оптимізаційних моделей.

2.4.2. Моделі теплових втрат.

Втрати теплоти через ізоляцію трубопроводів є важливим показником ефективності. Вони моделюються диференційними

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рівняннями теплопровідності або спрощеними стаціонарними моделями.
У складних оптимізаційних алгоритмах враховують вплив довжини, діаметру, матеріалу ізоляції та температурного градієнта.

2.4.3. Класи оптимізаційних задач у теплових мережах.

Задачі оптимального керування

Основною метою є мінімізація енергоспоживання або втрат теплоти.

При цьому оптимізуються параметри:

- температура подачі;
- витрата теплоносія;
- режими роботи насосів;
- конфігурація мережі (у випадку наявності перемичок і клапанів).

Задачі оптимального проектування

Включають підбір діаметрів труб, вибір обладнання, планування траси. Ці задачі належать до класу змішаних дискретно-неперервних оптимізаційних задач.

Мультикритеріальна оптимізація

У таких задачах одночасно враховують:

- мінімізацію вартості;
- мінімізацію втрат енергії;
- максимізацію надійності та стійкості.

Методи Парето-оптимізації дозволяють працювати з компромісами між цими критеріями.

2.4.4. Оптимізаційні методи та алгоритми.

Лінійні та нелінійні методи

У залежності від точності моделей та типу функцій використовують:

- лінійне програмування (за умов лінеаризації);
- квадратичне програмування;

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- нелінійне програмування, коли моделі містять нелінійні залежності витрат, температур або тиску.

Еволюційні алгоритми

До них належать генетичні алгоритми, еволюційні стратегії, рої частинок. Вони ефективні для задач з великою кількістю локальних мінімумів. Особливо корисні у складних мережах з дискретними рішеннями.

Гібридні методи

Поєднання детерміністичних і стохастичних алгоритмів дозволяє:

- швидко знаходити область глобального оптимуму;
- уточнювати рішення локальними методами.

Методи машинного навчання

Застосовують при потребі в прогнозуванні або адаптивному керуванні. Наприклад:

- регресійні моделі для прогнозу теплового навантаження;
- reinforcement learning для адаптивних режимів роботи насосів.

2.4.5. Урахування невизначеності та динаміки процесів.

Теплові мережі працюють у змінних умовах: зовнішня температура, поведінка споживачів, стан обладнання. Для цього застосовують:

- стохастичні моделі;
- робастну оптимізацію (з урахуванням меж варіацій);
- сценарний аналіз та оптимізацію при різних сценаріях навантаження.

Ці підходи підвищують стійкість системи до непередбачуваних змін і забезпечують надійне функціонування.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ №3

“Постановка задачі оптимізації та математична модель”

Консультант: Доктор Технічних наук Скочко В.І.

(Підпис)

(Дата)

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.1. Фізична концепція моделі теплової мережі.

Фізична концепція моделі базується на уявленні теплової мережі як лінійної двотрубною системи, у якій теплоносій рухається з сталою швидкістю від котельні до послідовно розташованих споживачів. Усі споживачі отримують теплову енергію від одного джерела, а їхнє навантаження змінюється відповідно до добового ходу температури зовнішнього середовища. У моделі враховано часову інерційність як самої котельні, так і процесу транспортування теплоносія, що зумовлює затримку реакції системи на температурні зміни. Такий підхід дозволяє дослідити динамічні властивості системи без ускладнення розрахунків тепловими втратами чи гідравлічними нелінійностями.

3.1.1. Загальна характеристика котельні та споживачів.

У даній моделі центральним об'єктом є котельня, яка забезпечує подачу теплової енергії групі споживачів, розташованих уздовж лінійної теплової магістралі. Котельня розглядається як джерело теплової потужності, значення якої відповідає сумі теплових навантажень усіх підключених об'єктів. Важливо підкреслити, що на етапі побудови моделі не враховуються теплові втрати в трубопроводах, оскільки мета полягає у вивченні динамічної поведінки системи, а не оцінці її ефективності. Таке припущення дозволяє виділити критичні впливові фактори, пов'язані з часовими затримками, та дослідити, як саме вони визначають роботу теплової мережі протягом добового циклу.

3.1.2. Просторове розташування споживачів і структура мережі

Особливістю системи є послідовне розміщення споживачів уздовж теплової лінії. Відстань від котельні до кожного наступного споживача наростає шляхом додавання довжин міжспоживацьких ділянок. Це формує протяжну лінійну систему, для якої характерна чітка залежність між

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

віддаленістю споживача та оперативністю забезпечення його тепловою енергією. Мережа є двотрубною: подача та зворот працюють як два паралельні канали. Така конфігурація є типовою для міських систем теплопостачання і дозволяє створити більш достовірну модель реальної мережі, у якій тепловий агент рухається односпрямовано по подаючій лінії та повертається охолодженим у зворотну.

3.1.3. Теплові навантаження споживачів та характер їх зміни.

Кожен споживач характеризується власним тепловим навантаженням, що є параметром, залежним від зовнішньої температури. У холодні періоди доби потреба в теплі для забезпечення нормативного мікроклімату зростає, тоді як у тепліші години навантаження зменшується. Саме ця залежність робить теплову систему динамічною, оскільки котельня повинна адаптувати свою роботу відповідно до зовнішніх умов.

У моделі закладено логіку, згідно з якою теплове навантаження споживачів визначається пропорційно до температурного графіка, встановленого для якісного регулювання теплопостачання. Це означає, що в системі змінюється не витрата теплоносія, а лише його температура, що відповідає сучасним вимогам енергоефективного керування.

3.2. Динаміка теплоносія та часові затримки.

3.2.1. Сталість швидкості руху теплоносія.

В моделі прийнято, що швидкість руху води в трубопроводах є сталою. Такий підхід дозволяє уникнути складних гідравлічних обчислень, пов'язаних із нерівномірністю потоку, зміною діаметрів труб, турбулентністю або температурним впливом на в'язкість теплоносія.

Стала швидкість забезпечує просту і точну оцінку часу транспортування теплоносія до споживачів. Крім того, це дозволяє значно спростити алгоритм чисельного розрахунку: кожна точка мережі має

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

визначений часовий інтервал, після якого на неї впливає зміна температури в котельні.

3.2.2. Час доставки теплоносія до віддалених ділянок мережі.

Однією з ключових характеристик моделі є затримка, зумовлена довжиною трубопроводів. Оскільки теплоносій не може передавати енергію миттєво, будь-яка зміна температури в котельні проявляється на віддалених споживачах лише після того, як вода фізично пройде відповідний шлях. Це створює природну часову інерційність системи і приводить до цікавих ефектів, зокрема до фазового зсуву температурних графіків між споживачами різної віддаленості. У реальних умовах це означає, що віддалені будівлі отримують зміну теплового режиму значно пізніше, і саме цей фактор відіграє критичну роль у підвищенні точності моделі.

3.2.3. Внутрішня технологічна інерційність котельні.

Котельня, як складний технологічний об'єкт, має власну часову інерційність. Це означає, що навіть якщо автоматична система фіксує зміну температури зовнішнього середовища, температура теплоносія не змінюється миттєво. Причини такого явища можуть включати інерційність палиникових пристроїв, запізнення у циркуляційних процесах, обмеження по швидкості зміни теплової потужності, а також організаційні затримки, пов'язані з логікою роботи автоматики.

Усе це формує додатковий часовий зсув, який необхідно враховувати для реалістичної оцінки реакції системи.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3. Математичне формулювання процесів та структура моделі

3.3.1. Температурний режим довкілля та його вплив на систему

Модель використовує синусоїдальну функцію для опису зміни температури навколишнього середовища протягом доби. Такий підхід добре відображає характерний добовий хід температури, притаманний зимовим умовам у місті Києві. Синусоїдальна апроксимація забезпечує плавну періодичність температурних змін та дозволяє розглянути роботу теплової мережі в умовах, наближених до реальних. Потреба кожного споживача у теплі прямо залежить від цієї зовнішньої температури, тому навіть незначні коливання можуть впливати на необхідну температуру подачі.

3.3.2. Структура математичної моделі

У моделі поєднано два взаємопов'язані процеси: теплогенерацію в котельні та транспортування теплоносія до споживачів. Температура подачі в котельні формує основний вхід для системи, а після цього по мережі поширюється теплоносій, який змінює свою температуру з певною часовою затримкою. Для кожного споживача формується власна температурна траєкторія, що є результатом зміни температури подачі у попередні моменти часу. Таким чином, модель дозволяє простежити часову еволюцію температур на всіх рівнях мережі та оцінити відповідність роботи котельні потребам споживачів.

3.3.3. Основні спрощення та припущення

У моделі використано кілька фундаментальних припущень, що дозволяють сфокусуватися на головних процесах. По-перше, мережа вважається двотрубною та тупиковою, що забезпечує просту та прозору структуру руху теплоносія. По-друге, витрата води та її швидкість

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

приймаються сталими, що дає можливість уникнути гідравлічних нелінійностей. По-третє, у моделі застосовується якісний метод регулювання тепловідпуску, за якого змінюється лише температура, а не витрата теплоносія. По-четверте, теплові втрати навмисне не включено до розрахунків, щоб не ускладнювати модель додатковими невідомими параметрами.

3.4. Відносна похибка

Відносна похибка розраховується як відношення різниці питомої втрати тиску досліджуваної формули і еталонної до питомої втрати тиску еталонної формули (в нашому випадку з формулою Колбрука-Вайта, яка є неявним рівнянням для турбулентного режиму). Графіки залежності відносної похибки від діаметру (в діапазоні 0.05–1 м) побудовані для швидкостей $v=1.1, 1.6, 2.1, 2.5, 3, 4$ м/с. Приклад графіку відносної похибки наведено на рисунку 6. Загалом стосовно застосовності формул Шифрінсона, Нікурадзе, Рео-Кумара, Гудара-Соннеда, Фенга і Бркіча можна зробити наступний розширений висновок:

для $v=1.1$ м/с відносна похибка варіюється від 6.5% (Шифрінсона при $d=0.05$) до 0.04% (Фенга при $d=1$ м). Криві спадають гіперболічно; найвища похибка для формули

Шифрінсона, найнижча для формул Фенга та Бркіча;

- для $v=1.6$ м/с відносна похибка коливається від 5.9% до 0.03%; подібна тенденція, з покращенням результатів для універсальних формул (Рео-Кумара, Гудара-Соннеда);
- для $v=2.1$ м/с відносна похибка знаходиться в межах від 5.5% до 0.02%; похибка $<1\%$ для формул Фенга та Бркіча при $d>0.5$;
- для $v=2.5$ м/с і вищих відносна похибка коливається від 5.2% (тільки для формули Шифрінсона) до $<0.01\%$; універсальні формули показують низьку відносну похибку.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Графіки демонструють, що апроксимації точніші при високому Re , з перевагою Фенга та Бркіча (середня відносна похибка $<0.2\%$).

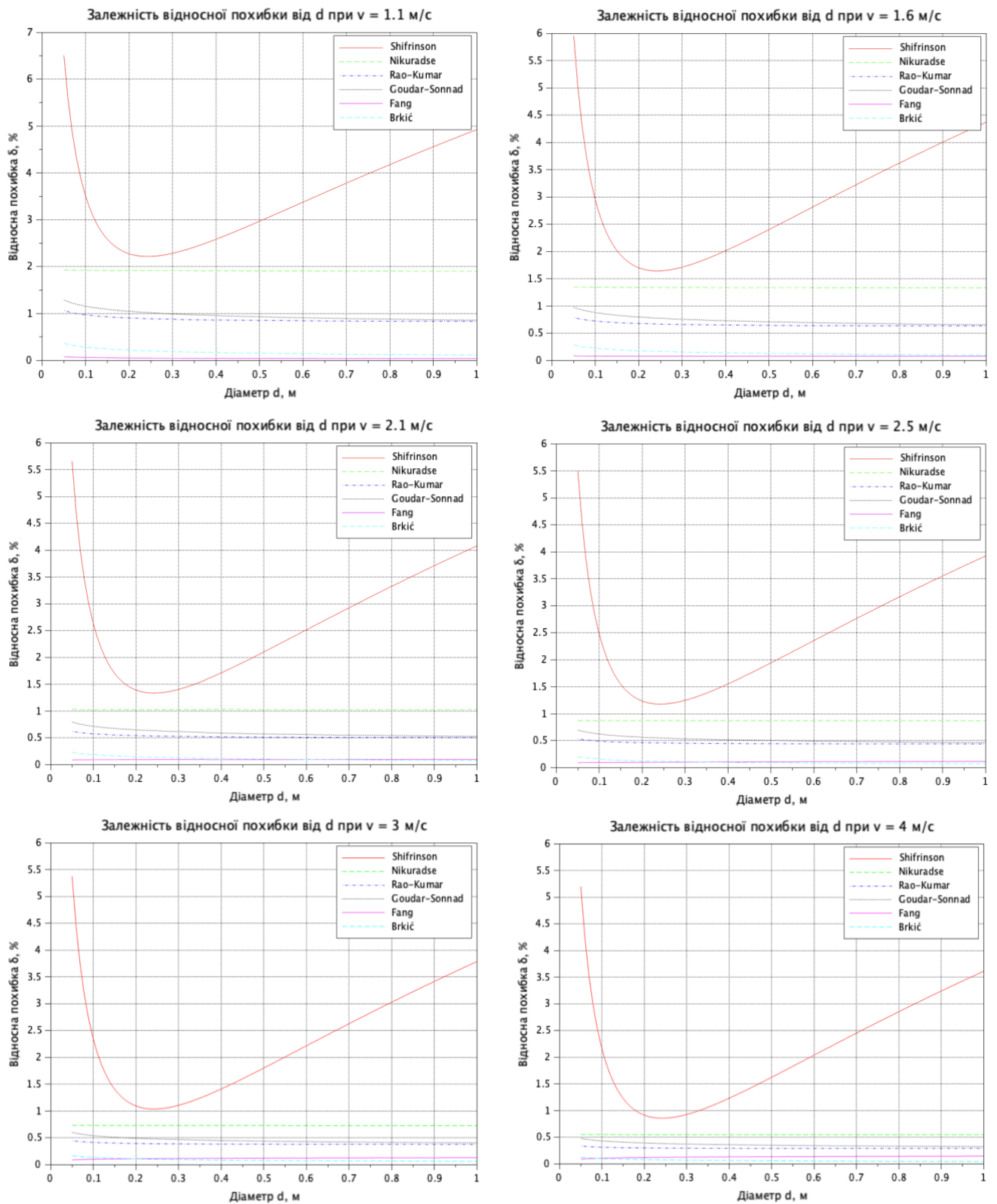


Рисунок 3.1. Залежність відносної похибки від діаметру для деяких швидкостей

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

У цілому можна відзначити, що всі досліджені універсальні формули демонструють високий рівень збіжності результатів і дуже малу відносну похибку, яка не перевищує 1%. Формула Нікурадзе також показує хорошу точність, з похибкою не більш ніж 1,5%. Особливо вирізняються формули Фенга та Бркіча, для яких відносна похибка становить менше 0,25%, що фактично підтверджує їхню придатність для високоточних технічних розрахунків. З огляду на такі незначні розходження між результатами, для інженерної практики вибір конкретної формули не є принциповим і не впливає суттєво на кінцевий техніко-економічний результат.

Додатково слід зазначити, що стабільність отриманих результатів підтверджує надійність досліджених рівнянь у широкому діапазоні чисел Рейнольдса та шорсткостей. Така поведінка формул свідчить про їхню адаптивність до різних режимів течії та практичну універсальність для використання в розрахунках трубопроводів. Незначні варіації похибки можуть бути пов'язані з особливостями апроксимаційних методів, на яких побудовані відповідні залежності. Крім того, сучасні комп'ютерні засоби дозволяють виконувати розрахунки миттєво, тому навіть мінімальні різниці у точності стають практично несуттєвими. Це забезпечує гнучкість інженера у виборі методики та дозволяє зосередитися на інших аспектах проектування, таких як оптимізація режимів роботи системи чи оцінка енергетичної ефективності.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ №4

“Методика чисельного розв’язання та алгоритми”

Керівник: Кандидат технічних наук Погосов О.Г.

(Підпис)

(Дата)

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Методика чисельного розв'язання передбачає дискретизацію добового періоду на малі часові інтервали, у межах яких параметри системи вважаються сталими. На кожному кроці часу обчислюється температура теплоносія на виході котельні з урахуванням затримки реакції, а також визначається момент її надходження до кожного споживача з поправкою на час транспортування. Алгоритм послідовно оновлює температурні значення подаючої та зворотної ліній, що дозволяє формувати динамічний профіль роботи всієї мережі протягом доби.

Для забезпечення стійкості обчислень використовується покрокове інтегрування, яке гарантує коректність результатів навіть за швидких змін зовнішньої температури. Такий підхід дає змогу точно моделювати поведінку системи та забезпечувати основу для подальших оптимізаційних розрахунків.

У сучасних умовах розвитку централізованих систем теплопостачання дедалі більшої актуальності набуває завдання підвищення їх ефективності та надійності. Одним із ключових факторів, що впливає на тепловий комфорт у приміщеннях, є своєчасна реакція системи на зміну зовнішніх температурних умов. У теплових мережах виникає затримка доставки теплоносія із заданими параметрами від котельні до кінцевих споживачів, яка залежить від довжини магістралей, швидкості руху води та режимів регулювання теплової потужності. Така затримка призводить до дисбалансу між фактичною потребою у теплі та його подачею, що, у свою чергу, знижує енергоефективність і комфортність опалення. Для адекватної оцінки цих процесів доцільно застосовувати математичні моделі, які враховують часову інерційність котельні та час транспортування теплоносія[26]. У даній роботі запропоновано методику розрахунку затримки температури теплоносія в централізованих системах теплопостачання. Модель базується на фізичних

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

припущеннях про сталість витрати й швидкості руху води, нехтування втратами тепла в мережі та залежність теплового навантаження від зовнішньої температури.

Для досягнення цієї мети необхідно формалізувати фізичну модель мережі, вивести аналітичні вирази для часових затримок і температурних величин, описати обчислювальний алгоритм для послідовного розрахунку подачі й звороту, а також визначити чутливість результатів до ключових параметрів, таких як швидкість руху теплоносія, протяжність трубопроводів та технологічна затримка регулювання.[4]

Запропонована методика ґрунтується на просторово-одновимірній кінематичній моделі транспортування теплоносія по двотрубній тупиковій мережі з урахуванням двох типів інерцій — технологічної, пов'язаної з роботою котельні, та фізичної, що визначається тривалістю доставки потоку теплоносія від джерела до споживача. Зміна зовнішньої температури задається або періодичною функцією, або експериментально вимірним часовим рядом, що дозволяє дослідити поведінку системи як у прогнозних, так і в реальних умовах. Режим роботи котельні описується залежністю проєктної подачі від зовнішньої температури, тоді як реальна подача враховує додаткову часову затримку $\tau_{\text{таут}}$, зумовлену інерційністю процесу регулювання.

Обчислення проводяться покроково з дискретним часовим кроком, який вибирається достатньо малим для адекватного відтворення характерних динамічних процесів. Такий підхід забезпечує можливість поетапного відслідковування як процесу нагрівання, так і охолодження теплоносія, а також дозволяє оцінити вплив ключових параметрів на величину затримки.[2] Крім того, модель відкриває перспективу застосування для оптимізації системи тепlopостачання, оскільки вона дає змогу оцінити ефективність регулювання, виявити критичні ділянки

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мережі та прогнозувати тепловий режим у різних сценаріях зміни кліматичних і експлуатаційних умов.

4.1. Вихідні параметри

n – кількість споживачів

$l(1)$ – відстань від котельні до першого споживача (м)

$k(i)$ – відстань між споживачами i та $i+1$ м.

Q_i – проектна потужність споживача I .

v — швидкість води в трубах (м/с).

τ — затримка котельні (с).

$T_{\text{supply,design}}$ — проектна температура подавальної води ($^{\circ}\text{C}$).

$T_{\text{return,design}}$ — проектна температура зворотної води ($^{\circ}\text{C}$).

$T_{\text{out,min}} = -20^{\circ}\text{C}$ — мінімальна зовнішня температура.

$T_{\text{in door}} = 20^{\circ}\text{C}$ — внутрішня температура.

$c_p = 4.186$ кДж/кг · К — питома теплоємність води.

4.2. Основні обчислення

Загальна проектна потужність котельні N визначається як сума проектних потужностей усіх споживачів. Це початковий крок для визначення базової витрати теплоносія і встановлення режиму котельні.[23]

$$N = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (4.1.)$$

4.2.1. Витрата теплоносія

Витрата теплоносія визначається з теплової потужності та прийнятого перепаду температур між подачею і зворотним трубопроводом. [24]

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальна витрата теплоносія (кг/с):

$$G = \frac{N}{c_p \cdot (T_{\text{supply,design}} - T_{\text{return,design}})} \quad (4.1.1.)$$

Витрата теплоносія для споживача I (кг/с):

$$G_i = \frac{Q_i}{c_p \cdot (T_{\text{supply,design}} - T_{\text{return,design}})} \quad (4.1.2.)$$

4.2.2. Відстань до споживачів та розташування у мережі

Відстань до першого споживача.

$$L(1) = l(1); \quad (4.1.3.)$$

Відстані до наступних споживачів ($i=2 \dots n$):

$$L(i) = L(i-1) + k(i-1). \quad (4.1.4.)$$

Час доставки теплоносія до споживача

Час, необхідний для доставки теплоносія до споживача I (с):

$$t_{\text{travel},i} = \frac{l(i)}{v} \quad (4.2.)$$

Зовнішня температура

Для аналізу добових коливань зовнішня температура

$T_{\text{out}}(t)$ задається періодичною функцією.

Використовується косинусний закон[25].

$$T_{\text{out}}(t) = -5 + 5 \cdot \cos\left(\frac{2\pi(t-50400)}{86400}\right) \quad (4.3.)$$

де 86400 с – тривалість доби, а 50400 с – зсув для врахування максимуму температури.

4.2.3. Температура подавальної води котельні

Залежність температури подавальної води від зовнішньої температури задається лінійною або кривою, визначеною нормами проектування:

$$T_{\text{supply}}(T_{\text{out}}) = T_{\text{supply,design}} - \frac{T_{\text{supply,design}} - T_{\text{in door}}}{T_{\text{in door}} - T_{\text{out,min}}} \cdot (T_{\text{out}} - T_{\text{out,min}}) \quad (4.3.1.)$$

З урахуванням технологічної затримки τ :

$$T_{\text{supply,boiler}}(t) = T_{\text{supply}}(T_{\text{out}}(t - \tau)) \quad (4.3.2.)$$

4.2.4. Температура подавальної води у споживачів

Температура подавальної води для споживачів i з урахуванням часу доставки:

$$T_{\text{supply},i}(t) = T_{\text{supply,boiler}}(t - t_{\text{travel},i}) \quad (4.4.)$$

Теплова потреба споживача i залежно від зовнішньої температури (кВт):

$$Q_{\text{demand},i}(t) = Q_i \cdot \frac{T_{\text{in door}} - T_{\text{out}}(t)}{T_{\text{in door}} - T_{\text{out,min}}} \quad (4.4.1.)$$

Температура зворотної води від споживачів

Температура зворотної води від споживача i обчислюється як:

$$T_{\text{return},i}(t) = T_{\text{supply},i}(t) - \frac{Q_{\text{demand},i}(t)}{G_i \cdot c_p} \quad (4.4.2.)$$

Температура зворотної води в котельні

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Температура зворотної води в котельні як середньозважене значення з урахуванням часу доставки:

$$T_{\text{return,boiler}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n G_i \cdot T_{\text{return},i}(t-t_{\text{travel},i})}{G} \quad (4.4.3)$$

4.2.5. Потужність котельні

Потужність котельні в момент часу t (кВт):

$$Q_{\text{boiler}}(t) = G \cdot c_p \cdot (T_{\text{supply,boiler}}(t) - T_{\text{return,boiler}}(t)) \quad (4.4.4.)$$

Чисельне моделювання на базі запропонованої методики дає адекватні та фізично обґрунтовані результати, що підтверджує коректність прийнятих припущень і алгоритмічної реалізації. Зокрема, для тестового сценарію з чотирма абонентами, розташованими на рівних відстанях уздовж кільцевої тепломережі, із міжвузловим інтервалом близько 4 км, тепловим навантаженням кожного на рівні 4000 кВт та прийнятим температурним графіком 110/70 °С, отримано характерну інерційність тепловідгуку системи. Розрахунки показують, що затримка реакції на зміну температурних параметрів у останнього в кільці споживача становить близько 9,33 години. Слід зазначити, що цей результат отримано при припущеній швидкості руху теплоносія 1 м/с, що є нижчою від типових значень для реальних теплових мереж, і тому фактичні часові лаги в реальних умовах можуть бути меншими.

Додатково проведений аналіз показує, що амплітуда температурних коливань у віддалених вузлах мережі згладжується внаслідок теплової інерції трубопроводів та теплоємності води, що дозволяє оцінювати динамічну поведінку мережі при змінних кліматичних впливах. Графік зміни температур для цієї конкретної задачі наведено на рис. 1, де

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відображено характер температурної відповіді кожного споживача та джерела теплової енергії при моделюванні добового коливання зовнішньої температури на підставі архівних погодних даних лютого 2024 року.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

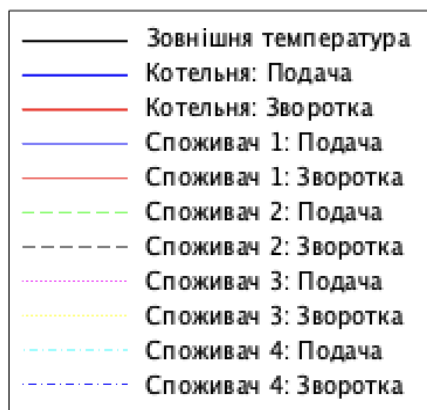
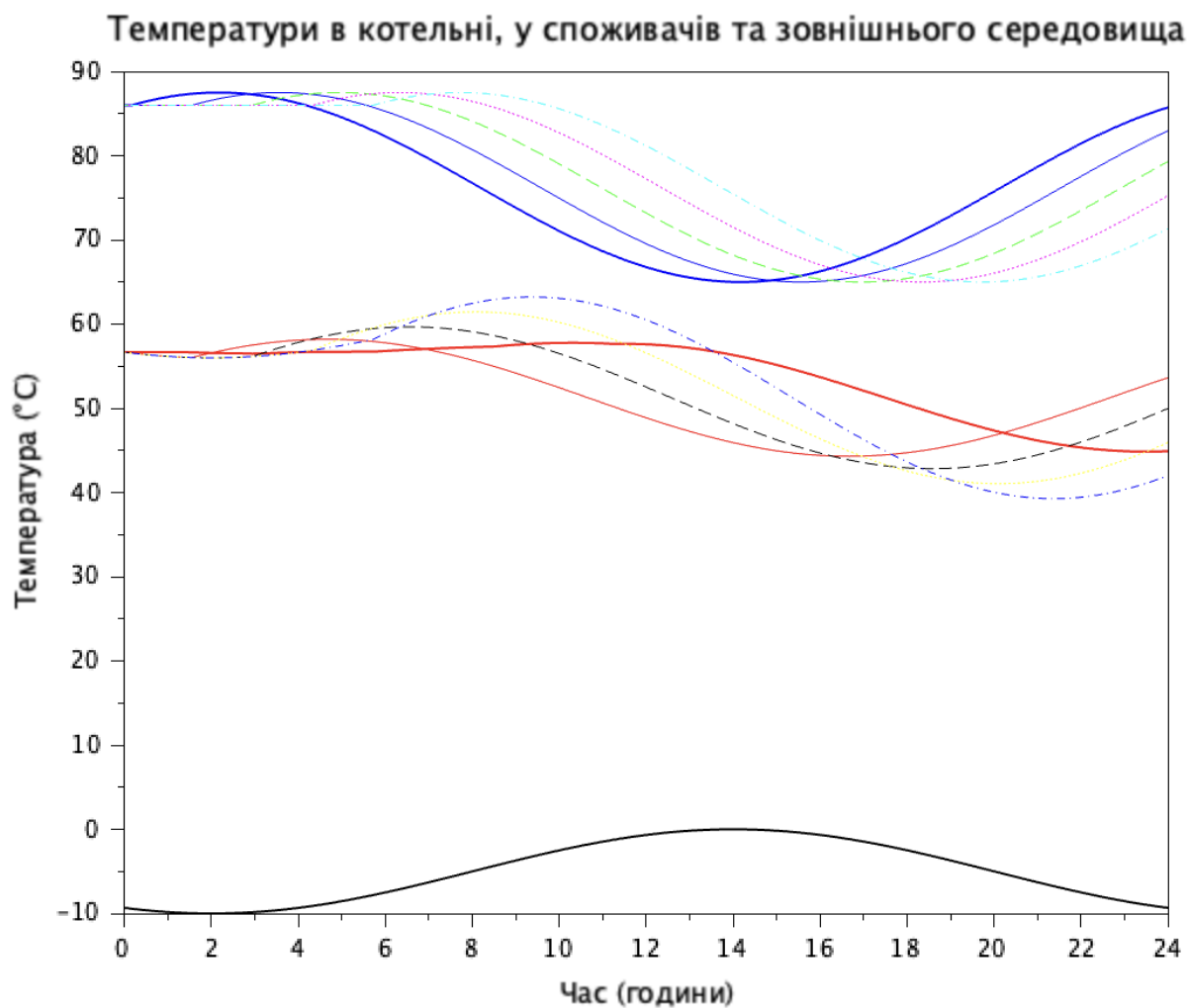


Рис. 4.1. Графік зміни температур споживачів і джерела теплової енергії при імітації добового коливання зовнішньої температури (на підставі архівних погодних даних лютого 2024 року)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Розділ №5

“Практичні розрахунки та приклад практичного використання програми”

Керівник: Кандидат технічних наук Погосов О.Г.

(Підпис)

(Дата)

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.1. Поняття енергії, ексергії та первинної енергії.

Поняття «первинна енергія» закріплене в українському законодавстві у сфері енергоефективності, зокрема в Законі України «Про енергетичну ефективність» № 1818-ІХ від 21 жовтня 2021 року. Згідно з цим нормативним актом, первинна енергія — це енергія, що походить із відновлюваних або невідновлюваних джерел і не зазнавала перетворень чи трансформацій. Тісно пов'язане з цим поняттям і визначення первинного енергетичного ресурсу — природний ресурс, який не зазнавав штучної обробки, переробки чи перетворення.

Нижче наведено визначення енергії, ексергії та первинної енергії з метою їхнього порівняльного аналізу.

5.1.1. Поняття енергії.

Енергія — фундаментальне поняття термодинаміки, що характеризує здатність системи виконувати роботу або передавати тепло. Відповідно до першого закону термодинаміки, енергія зберігається: вона не виникає і не зникає, а лише переходить із однієї форми в іншу (наприклад, із теплової в механічну). Енергія проявляється як у макроскопічних формах (кінетична, потенційна), так і в мікроскопічних (внутрішня, зокрема хімічна). Однак саме поняття енергії головно описує кількість енергії і не віддзеркалює її якість: наприклад, 1 кДж теплоти малої температури кількісно рівний 1 кДж електричної енергії, але їхня корисність для виконання роботи відрізняється.

5.1.2. Ексергія.

Ексергія визначається як максимальна кількість корисної роботи, яку система може виконати, перебуваючи в заданих умовах відносно навколишнього середовища. Її природа ґрунтується на другому законі термодинаміки, тому ексергія враховує не лише кількісний, а й якісний

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аспект енергії — тобто здатність цієї енергії бути перетвореною на роботу.

На відміну від енергії, ексергія не є величиною, що зберігається: у будь-якому реальному, незворотному процесі частина ексергії безповоротно втрачається через зростання ентропії. Наприклад, низькопотенційне тепло з температурою близько 41 °С має ексергійну цінність лише приблизно 5 % від його загального енергетичного вмісту, якщо температура довкілля становить 25 °С. Ексергійний аналіз дозволяє точно визначати місця появи неефективностей — зокрема втрати, пов'язані з тепловими градієнтами, тертя, перемішуванням чи хімічними реакціями — і є ефективним інструментом для удосконалення термодинамічних процесів та підвищення загальної ефективності енергетичних систем.

5.1.3. Первинна енергія.

Первинна енергія — це енергія природного походження, яка не зазнала жодних техногенних перетворень і надходить у свою «сиру» форму. До неї належать викопні палива (вугілля, нафта, природний газ), а також відновлювані джерела — сонячна, вітрова, гідравлічна, геотермальна та ядерна енергія. Концепція первинної енергії включає також ресурси, необхідні для її добування, очищення та транспортування до місця подальшої трансформації — наприклад, до електростанції чи теплоенергетичної установки. На відміну від неї, вторинна енергія є продуктом перетворення первинної, як-от електрична енергія, отримана у паротурбінному циклі Ренкіна внаслідок спалювання вугілля. Додатково у сучасних методиках енергоаудиту розглядають і поняття кінцевої та корисної енергії, що дозволяє простежити шлях енергоресурсу від джерела до його фактичного використання.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						86
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.2. Порівняльний аналіз первинної енергії та ексергії.

На основі викладених визначень можна сформувати узагальнену порівняльну таблицю (Таблиця 5.1.), яка систематизує ключові відмінності між енергією, ексергією та первинною енергією.

Таблиця 5.1. Порівняння понять енергії, ексергії та первинної енергії

Аспект	Енергія	Ексергія	Первинна енергія
Основний зміст	Кількість (збереження за першим законом термодинаміки).	Якість та корисна робота (врахування другого закону, руйнування в незворотних процесах).	Джерело та витрати на виробництво (енергія до перетворення).
Збереження	Зберігається, перетворюється без втрат кількості.	Не зберігається; руйнується через ентропію.	Не про збереження, а про первинний вхід ресурсів; враховує втрати на етапах видобутку/перетворення.
Врахування якості	Не враховує; 1 кДж тепла = 1 кДж електрики кількісно.	Враховує; низькоякісна енергія має низьку ексергію (наприклад, відпрацьоване тепло).	Частково враховує через коефіцієнти перетворення (наприклад, ефективність електростанцій ~30-40%).

Застосування в науці та інженерії	Енергетичний баланс, оцінка ефективності на основі кількості (наприклад, теплова ефективність ~70-80% у реформінгу).	Оптимізація систем, ідентифікація втрат (ексергетична ефективність нижча, наприклад, ~47% для пиролізу газу).	Оцінка загального споживання ресурсів, планування енергетичної безпеки (наприклад, TPES — сумарне постачання первинної енергії).
Переваги аналізу за підходом	Простота, фокус на збереженні.	Глибше розуміння неефективності, екологічна оцінка.	Врахування повного циклу від ресурсу до кінцевого використання.
Недоліки поняття	Ігнорує деградацію якості, переоцінює ефективність.	Складніший розрахунок, залежить від оточення.	Не фокусується на якості, більше про ресурси ніж на корисній роботі.

Порівняння цих понять демонструє, що енергія виступає фундаментальним кількісним показником, тоді як ексергія забезпечує якісну оцінку процесів і дає змогу глибше аналізувати та оптимізувати їхню ефективність. Первинна енергія, своєю чергою, підкреслює ресурсні витрати на початкових етапах енергетичного ланцюга, що фактично створює основу для подальшої оцінки повного життєвого циклу енергетичного проєкту. У сучасних енергетичних системах ексергійний підхід дозволяє максимально ефективно використовувати первинні

ресурси на всіх етапах — від їхнього видобутку до постачання кінцевому споживачеві, що набуває особливого значення в умовах переходу до низьковуглецевої енергетики. Оскільки ексергія враховує всі незворотні втрати, її аналіз зазвичай демонструє нижчі показники ефективності порівняно з традиційним енергетичним аналізом, роблячи його більш придатним для оцінки сталості та раціональності великих енергетичних систем.

У процесі оптимізації систем теплопостачання — зокрема під час вибору раціональних швидкостей теплоносія та діаметрів трубопроводів — важливо враховувати, що енергетичні витрати на роботу циркуляційних насосів пов'язані з використанням електричної енергії, тоді як теплові втрати мережі стосуються теплової енергії. Оскільки вартість і «паливна ціна» виробництва електричної та теплової енергії суттєво відрізняються, логічно застосовувати методи оптимізації, основані на мінімізації витрат первинної енергії.

Для задачі визначення оптимальних діаметрів і швидкостей у тепловій мережі цільову функцію можна подати у вигляді залежності, яка за суттю узгоджується з формулюванням цільової функції:

$$PE_{DH} = PE_{\text{pump}} + PE_{\text{heatloss}} + PE_{\text{fuel}}, \quad (5.1.)$$

де PE_{DH} — первинна енергія, пов'язана з постачанням теплової енергії, безрозмірний; PE_{pump} — первинна енергія, пов'язана з витратою електричної енергії на роботу двигуна мережевого насоса централізованої системи теплопостачання, кВт*год; PE_{heatloss} — первинна енергія, пов'язана з втратою теплової енергії на ділянці в наслідок тепловіддачі від поверхні трубопроводу до навколишнього середовища, кВт*год; PE_{fuel} — первинна енергія, пов'язана з генерацією теплової енергії на джерелі

централізованої системи теплопостачання, кВт*год (враховуються лише для розрахунків абсолютних значень викидів ПГ);

5.3. Цільова функція та розрахунок оптимальних параметрів тепломережі.

Первинна енергія, пов'язана з витратою електричної енергії на роботу двигуна насоса централізованої системи теплопостачання можуть бути представлені наступним чином:

$$PE_{\text{pump}} = FC_{\text{pump}} \cdot PE_{\text{el}}, \quad (0.1)$$

де FC_{pump} – витрата електричної енергії на роботу двигуна насоса, кВт*год; PE_{el} – коефіцієнт первинної енергії, пов'язаний зі спалюванням палива для виробництва електричної енергії, безрозмірний.

В дослідженні прийнято розрахунковий час роботи системи на рівні 1 години. При цьому витрата електричної енергії може бути розрахована згідно відомої залежності [**Error! Reference source not found.**]:

$$FC_{\text{pump}} = \frac{G \cdot \Delta P}{\eta} \cdot \tau \cdot 10^{-3}, \quad (0.2)$$

де G – витрата теплоносія, м³/с; ΔP – втрата тиску на розрахунковій ділянці, Па; η – ККД насосу (включно з ефективністю всіх його елементів), %; τ – час роботи системи (припущенням є постійність витрати теплоносія протягом часу τ , або ж робота системи в діапазоні з якісним регулюванням відпуску теплової енергії), год.

Витрата теплоносія може бути визначена згідно залежності:

$$G = S \cdot v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v, \quad (0.3)$$

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де S – площа перерізу трубопроводу, м; d – діаметр трубопроводу системи теплопостачання на ділянці, м; v – швидкість руху теплоносія на ділянці, м/с.

Залежність для визначення втрат тиску під час ламінарної усталеної течії як функції динамічного тиску можна отримати, виходячи з рівнянь Нав'є—Стокса. Модифікована форма цього співвідношення відома як рівняння Дарсі—Вейсбаха. Його початково сформулював французький інженер Анрі Дарсі (1803–1858) для розрахунків у трубопроводах. Згодом німецький інженер Юліус Вейсбах (1806–1871), спираючись на масштабні експериментальні дані та логічні висновки, довів застосовність цього рівняння не лише для ламінарних, а й для перехідних та турбулентних режимів течії, а також для оцінки втрат у трубопровідній арматурі та клапанах. У цьому дослідженні формули (5.5.) застосовуються через те, що на розглянутій ділянці трубопроводу густина теплоносія практично не змінюється, що характерно для систем централізованого теплопостачання.

$$\Delta P = \zeta \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (0.4)$$

де ρ – густина теплоносія, кг/м³; ζ – безрозмірний коефіцієнт втрат на тертя.

Враховуючи загально відомий вираз для визначення коефіцієнту втрат на тертя в залежності від коефіцієнту Дарсі, довжини ділянки і її діаметру [**Error! Reference source not found., Error! Reference source not found.**], отримаємо вираз для визначення витрати енергії насосом:

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$FC_{\text{pump}} = \frac{\lambda \cdot \frac{L \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \pi \cdot d^2}{2 \cdot 4} \cdot v}{\eta} \cdot \tau \cdot 10^{-3} = \frac{\pi \cdot \lambda \cdot L \cdot \rho}{8 \cdot \eta} \cdot d \cdot v^3 \cdot \tau \cdot 10^{-3}, \quad (0.5)$$

де λ – безрозмірний коефіцієнт гідравлічного тертя (коефіцієнт Дарсі); d – діаметр трубопроводу, м; L – довжина ділянки трубопроводу, м.

Тоді викиди парникових газів можуть бути визначені наступним чином:

$$PE_{\text{pump}} = \frac{\pi \cdot \lambda \cdot L \cdot \rho}{8 \cdot \eta} \cdot \tau \cdot 10^{-3} \cdot PE_{\text{el.}} \cdot d \cdot v^3, \quad (0.6)$$

Визначення безрозмірний коефіцієнт гідравлічного тертя проводиться в цій роботі на підставі залежності Альтшуля в третій гідравлічній області.

$$\lambda = 0.11 \cdot \left(\frac{\Delta_E}{d} \right)^{0.25} \quad (0.7)$$

де Δ_E – еквівалентна абсолютна шорсткість (приймається на рівні 0.3 мм), мм.

Припущення щодо застосування формули Альтшуля базується на фактичних гідравлічних режимах теплових мереж (описаних у відповідних розділах даної роботи), для яких характерні параметри роботи знаходяться на в зоні гідравлічно шорстких труб (при швидкостях руху теплоносія, які перевищують близько 1.1-1.2 м/с).

Число Рейнольдса визначається класичною залежністю:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (5.8.1.)$$

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						92
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де v – кінематична в'язкість теплоносія, приймається на рівні 0.413 (при температурі 70 °C), м²/с.

Таким чином залежність варто замінити наступною:

$$PE_{\text{pump}} = \frac{0.11 \cdot \pi \cdot L \cdot \rho}{8 \cdot \eta} \cdot \tau \cdot 10^{-3} \cdot PE_{\text{el.}} \cdot d \cdot v^3 \cdot \left(\frac{\Delta_E}{d}\right)^{0.25},$$

$$PE_{\text{pump}} = \frac{\pi \cdot L \cdot \rho}{72.7 \cdot \eta} \Delta_E^{0.25} \cdot \tau \cdot 10^{-3} \cdot PE_{\text{el.}} \cdot v^3 \cdot d^{0.75}. \quad (0.8.)$$

Первинна енергія, пов'язана з втратою теплової енергії на ділянці внаслідок тепловіддачі від поверхні трубопроводу до навколишнього середовища, кВт*год, може бути розраховані наступним чином:

$$PE_{\text{heatloss}} = FC_{\text{heatloss}} \cdot PE_{\text{heatloss}}, \quad (0.9.)$$

де FC_{heatloss} – втрати теплової енергії, кВт*год;

$PE_{\text{heatloss}} = PE_{\text{fuel}}$ – коефіцієнт первинної енергії, пов'язаної з втратами теплової енергії на ділянці, який рівний коефіцієнту первинної енергії, пов'язаної з генерацією теплової енергії на джерелі централізованої системи теплопостачання, безрозмірний.

Для фізичної моделі, поданої вище формула може бути трансформована наступним чином:

$$PE_{\text{heatloss}} = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot Q_{\text{loss}} \cdot PE_{\text{fuel}} \cdot \tau, \quad (0.10.)$$

де Q_{loss} – втрати теплової енергії через поверхню трубопроводу, кВт.

З урахуванням втрат теплової енергії через поверхню трубопроводу згідно закону Ньютона-Ріхмана [**Error! Reference source not found.**] отримаємо:

$$E_{\text{CO}_2\text{eq,heatloss}} = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot \alpha \cdot \pi \cdot d_{\text{ins}} \cdot L \cdot (t_{\text{с.т.}} - t_{\text{зов.}}) \cdot 10^{-3} \cdot PE_{\text{fuel}} \cdot \tau, \quad (0.11.)$$

де α – коефіцієнт теплопередачі, Вт/м²·К; $t_{с.т.}$ – середня температура середовища, К; $t_{зов}$ – зовнішня температура, К; d_{ins} – зовнішній діаметр теплової ізоляції, м.

Незручність отриманої залежності пов'язана з невідомим значенням товщини теплової ізоляції та варіативними значеннями коефіцієнту тепловіддачі. В даній масштабованій задачі немає мети розраховувати оптимальну товщину теплової ізоляції, чому вже й так присвячена значна кількість праць [Error! Reference source not found.-Error! Reference source not found.]. Тому замість отриманої залежності застосуємо підхід через нормативні втрати теплової енергії:

$$PE_{heatloss} = q_{spec} \cdot L \cdot PE_{fuel} \cdot \tau, \quad (0.12.)$$

де q_{spec} – нормативний питомий тепловий потік, Вт/м [Error! Reference source not found.].

Для можливості представлення нормативного теплового потоку через діаметр трубопроводу, проаналізуємо питомі показники густини теплового потоку через ізольовану поверхню трубопроводів при двотрубному підземному безканальному прокладанні та при прокладанні в непрохідних каналах з розрахунковою середньорічною температурою ґрунту +5 °С на глибині закладання трубопроводів [Error! Reference source not found.] та отримаємо штучну наближену формулу для розрахунку нормативного теплового потоку:

$$q_{spec} = 348 \cdot d^{0.5}, \quad (0.13.)$$

Тоді остаточна залежність для визначення викидів буде такою:

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$PE_{\text{heatloss}} = 348 \cdot 10^{-3} \cdot d^{0.5} \cdot L \cdot PE_{\text{fuel}} \cdot \tau, \quad (0.14.)$$

Викиди парникових газів, пов'язані з генерацією теплової енергії на джерелі централізованої системи тепlopостачання можуть бути розраховані згідно залежності [**Error! Reference source not found.**]:

$$PE_{\text{fuel}} = FC_{\text{fuel}} \cdot PE_{\text{fuel}}, \quad (0.16.)$$

де FC_{fuel} – витрата палива, ТДж;
 PE_{fuel} – коефіцієнт первинної енергії, пов'язаний з генерацією теплової енергії на джерелі централізованої системи тепlopостачання, безрозмірний.

Для фізичної моделі, поданої вище залежність може бути трансформована наступним чином:

$$PE_{\text{CO}_2\text{eq,fuel}} = Q_1 \cdot \tau \cdot PE_{\text{fuel}}, \quad (0.17.)$$

де Q_1 – вхідна теплова потужність системи, кВт;
 τ – значення періоду роботи системи тепlopостачання, в даному дослідженні приймається рівним 1 год.

З урахуванням втрат теплової енергії на ділянці із залежності отримаємо:

$$PE_{\text{fuel}} = (Q_2 + 348 \cdot d^{0.5} \cdot L \cdot 10^{-3}) \cdot \tau \cdot PE_{\text{fuel}}, \quad (0.18.)$$

де Q_2 – кінцева (вихідна) теплова потужність системи, кВт; d – діаметр трубопроводу, м.

Враховуючи залежності, викладені в цьому розділі вище, маємо зведену цільову функцію наступного вигляду:

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$PE_{DH} = \frac{\pi \cdot L \cdot \rho}{72.7 \cdot \eta} \Delta_E^{0.25} \cdot \tau \cdot 10^{-3} \cdot PEF_{el.} \cdot v^3 \cdot d^{0.75} + 348 \cdot 10^{-3} \cdot d^{0.5} \cdot L \cdot PEF_{fuel} \cdot \tau + (Q_2 + 348 \cdot d^{0.5} \cdot L \cdot 10^{-3}) \cdot \tau \cdot PEF_{fuel}, \quad (0.19.)$$

Приведемо залежність до функціонального вигляду:

$$PE_{CO_2eq,DH}(d, v) = \left(\frac{\pi \cdot L \cdot \rho}{72.7 \cdot \eta} \Delta_E^{0.25} \cdot \tau \cdot 10^{-3} \cdot PEF_{el.} \right) \cdot v^3 \cdot d^{0.75} + (348 \cdot 10^{-3} \cdot L \cdot PEF_{fuel} \cdot \tau) \cdot d^{0.5} + (\tau \cdot PEF_{fuel}) \cdot (Q_2 + 348 \cdot d^{0.5} \cdot L \cdot 10^{-3}), \quad (0.20.)$$

Для спрощення вигляду функції проведемо заміну:

$$K1 = \frac{\pi \cdot L \cdot \rho}{72.7 \cdot \eta} \Delta_E^{0.25} \cdot \tau \cdot 10^{-3} \cdot PEF_{el.} \quad (0.21.)$$

$$K2 = 348 \cdot 10^{-3} \cdot L \cdot PEF_{fuel} \cdot \tau \quad (0.22.)$$

$$K3 = \tau \cdot PEF_{fuel} \quad (0.23.)$$

Спрощена функція має наступний вигляд:

$$PE_{DH} = K1 \cdot v^3 \cdot d^{0.75} + K2 \cdot d^{0.5} + K3 \cdot (Q_2 + 348 \cdot d^{0.5} \cdot L \cdot 10^{-3}) \quad (0.24.)$$

$$PE_{DH} = K1 \cdot v^3 \cdot d^{0.75} + K2 \cdot d^{0.5} + K3 \cdot (Q_2 + 348 \cdot d^{0.5} \cdot L \cdot 10^{-3}) \quad (0.25.)$$

Враховуючи, що потужність може бути визначена згідно залежності:

$$Q_2 = G \cdot c \cdot (T_2 - T_1), \quad (0.26.)$$

$$Q_2 = G \cdot c \cdot (T_2 - T_1) = G_{vol} \cdot \rho \cdot c \cdot (T_2 - T_1) = \frac{\rho \cdot v \cdot \pi \cdot d^2}{4} \cdot c \cdot (T_2 - T_1), \quad (0.27.)$$

де G – масова витрата теплоносія, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$, c – теплоємність теплоносія, $\text{кДж/кг}^\circ\text{C}$, T_2 і T_1 – температура в подавальному і зворотному трубопроводах, $^\circ\text{C}$,

Маємо обмеження цільової функції:

$$\begin{cases} d > 0, \\ v > 0, \\ d^2 \cdot v \geq \frac{4 \cdot Q_2}{\pi \cdot c \cdot (T_1 - T_2) \cdot \rho} \end{cases}, \quad (0.28.)$$

При цьому коефіцієнти первинної енергії є характерними значеннями для національних економік світу. В Україні коефіцієнти (фактори) первинної енергії визначені в нормативних документах, зокрема в Методиці визначення енергетичної ефективності будівель, затвердженій Наказом Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11.07.2018 № 169 [**Error! Reference source not found.**]. Ці коефіцієнти застосовуються для розрахунку первинної енергії в будівлях і враховують невідновлювану та відновлювану частини. Нижче наведено таблицю з значеннями з Додатка 10 до цієї Методики.

5.3.1. Порівняння та аналіз коефіцієнтів первинної енергії

Таблиця 0.1. Коефіцієнти (фактори) первинної енергії [**Error! Reference source not found.**]

№	Енергоносій	Тип	fP (невідновлю вана частина)	fP (відновлюва на частина)

1	Горючі корисні копалини	Тверді	1,1	-
2	Горючі корисні копалини	Скраплені	1,1	-
3	Горючі корисні копалини	Газоподібні	1,1	-
4	Біологічне паливо	Тверде	0,2	0,9
5	Біологічне паливо	Скраплене	0,5	0,6
6	Біологічне паливо	Газоподібне	1,1	-
7	Електрична енергія	Централізована	2,3	-
8	Електрична енергія	Централізоване опалення	1,3	-
9	Електрична енергія	Централізоване охолодження	1,3	-
10	Вироблений на місці	Сонячна термічна	0	0
11	Вироблений на місці	Вітрова	0	0
12	Вироблений на місці	Природна (Гео-, аеро-, гідротермальна)	0	0
13	Експортований	Електрична (ніколи не перероблена)	2,3	-

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Кваліфікаційна робота

Арк.

98

14	Експортований	Електрична (тимчасово експортована та перероблена пізніше)	2,3	-
----	---------------	--	-----	---

Згідно з ДСТУ EN ISO 52000-1:2023 [Error! Reference source not found.], конкретні числові значення факторів первинної енергії визначаються на національному рівні в додатках або пов'язаних нормативних документах. При цьому рекомендовані значення факторів первинної енергії містяться в скасованому в Україні ДСТУ Б EN 15603:2013 [Error! Reference source not found.]. Документ містить інформативні додатки, де значення базуються на даних з [Error! Reference source not found.]. Ці фактори включають енергію на будівництво систем трансформації та транспортування для перетворення первинної енергії в поставлену і наводяться в таблиці нижче.

Таблиця 5.2. Коефіцієнти (фактори) первинної енергії загальної енергетики [Error! Reference source not found., Error! Reference source not found.]

Паливо (в дужках вказана назва англійською мовою як у джерелі)	Фактор первинної енергії fp (Невідновлювана)	Фактор первинної енергії fp (Загальний)
Мазут (Fuel oil)	1.35	1.35
Газ (Gas)	1.36	1.36
Антрацит (Anthracite)	1.19	1.19
Буре вугілля (Lignite)	1.40	1.40
Кокс (Coke)	1.53	1.53

Деревна стружка (Wood shavings)	0.06	1.06
Поліна (Log)	0.09	1.09
Поліна букові (Beech log)	0.07	1.07
Поліна соснові (Fir log)	0.10	1.10
Електроенергія з гідроелектростанції (Electricity from hydraulic power plant)	0.50	1.50
Електроенергія з атомної електростанції (Electricity from nuclear power plant)	2.80	2.80
Електроенергія з вугільної електростанції (Electricity from coal power plant)	4.05	4.05
Електроенергія Mix UCРTE (Electricity Mix UCРTE)	3.14	3.31

Далі будуть застосовані наступні коефіцієнти (фактори первинної енергії): для електричної енергії (в контексті роботи циркуляційного насосу) – національний 2,3; для теплової енергії – національний 1,1. В програмному середовищі SciLab 2025.1.0 було розроблено програмний код (наведено в додатках 4 і 5) для чисельного моделювання витрати первинної енергії ділянки теплової мережі, результати роботи якого наводяться в таблиці нижче.

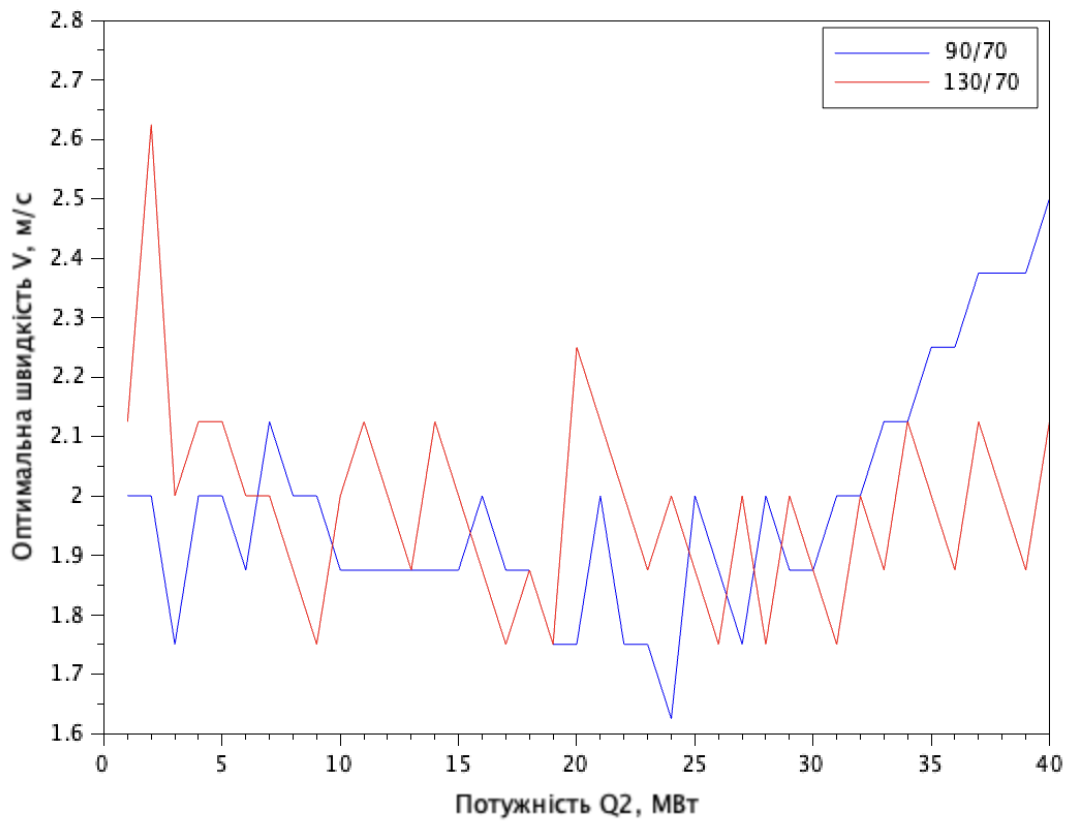
5.4. Характерні оптимальні значення діаметру і швидкості

Таблиця 0.3. Характерні оптимальні значення діаметру і швидкості ділянки теплової мережі при різних значеннях потужності приєднаного абонента

Потужність абонента, кВт	Оптимальне значення діаметру, мм	Оптимальне значення швидкості руху теплоносія, м/с	Величина первинної енергії, кВт*год
500	50	1.256	946
1000	87.5	2	1344
2000	160	3.49	2568

Результат чисельної обробки масиву потужностей для графіків 90/70 і 130/70 наведено на рисунку нижче.

Рисунок 0.1 Коливання оптимальної швидкості теплоносія для температурних режимів мережі 90/70 і 130/70 для потужності ділянки від 1000 до 40000 кВт



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

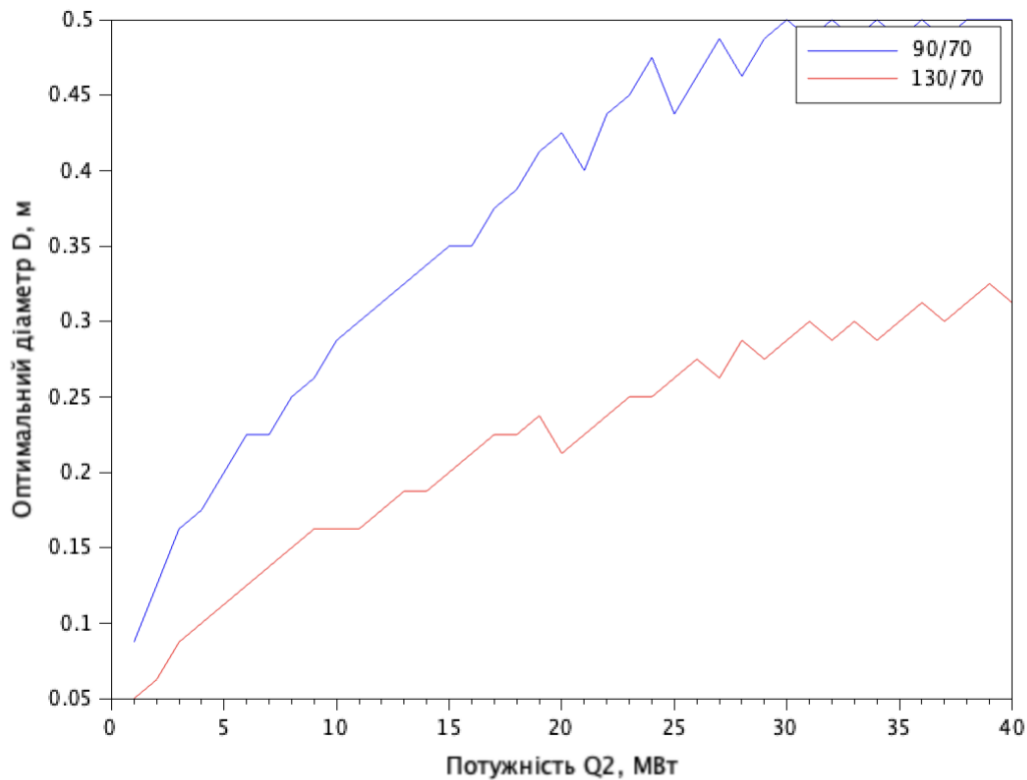


Рисунок 0.2 Значення оптимальних діаметрів для температурних режимів мережі 90/70 і 130/70 в діапазоні потужності ділянки від 1000 до 40000 кВт

5.5. Програмна реалізація комп'ютерного моделювання витрати первинної енергії на ділянці теплової мережі.

```

clear; clc;
// Введення параметрів користувачем
Q2 = input("Введіть потужність приєднаного абонента (Q2, кВт): ");
T1 = input("Введіть температуру подавального трубопроводу (T1, °C): ");
T2 = input("Введіть температуру зворотнього трубопроводу (T2, °C): ");
// Константи
dE = 0.0003; // шорсткість, м
tau = 1; // час, година
eta = 0.95; // ККД
rho = 1000; // густина теплоносія, кг/м3
PEFel = 2.3;
PEFfuel = 1.1;
L = 1000;
T = 438000;
// Розрахунок коефіцієнтів
K1 = ((%pi * L * rho) / (72.7 * eta)) * (dE^0.25) * 10^(-3) * PEFel * tau;
K2 = 348 * 10^(-3) * L * PEFfuel * tau;
K3 = PEFfuel * tau;
disp(K1);

```

```

disp(K2);
disp(K3);
// Діапазон діаметрів і швидкостей
d_vals = -0.5:0.0125:0.5; // м (81 значення)
v_vals = -10:0.125:10; // м/с (161 значення)
// Створюємо сітку
[DD, VV] = meshgrid(d_vals, v_vals);
// Перевірка розмірів сітки
disp("Розмір DD: "); disp(size(DD)); // 161x81
disp("Розмір VV: "); disp(size(VV)); // 161x81
// Створюємо матрицю значень функції E
E = K1 * (DD.^0.75 .* VV.^3) + K2 * DD.^0.5 + K3 * (Q2 + 348 * DD.^0.5 * L * 10^-3);
// Перевірка розміру E
disp("Розмір E: "); disp(size(E)); // 161x81
// Розрахунок порогового значення
threshold = 4 * Q2 / (%pi * 4.186 * (T1 - T2) * rho);
disp("Threshold: "); disp(threshold);
// Створюємо матрицю кольорів розміром 161x81
colors = ones(length(v_vals), length(d_vals)); // 161x81
for i = 1:length(v_vals)
for j = 1:length(d_vals)
D = DD(i,j);
V = VV(i,j);
if D >= 0 & V >= 0
if (D^2) * V > threshold
colors(i,j) = 3; // Червоний
else
colors(i,j) = 2; // Зелений
end
else
colors(i,j) = 1; // Білий
end
end
end
// Перевірка розміру colors
disp("Розмір colors: "); disp(size(colors)); // 161x81
// Побудова поверхні
clf();
surf(d_vals, v_vals, E, colors);
// Налаштування колірної карти
colormap([1, 1, 1; 0, 1, 0; 1, 0, 0]); // Білий, зелений, червоний
// Налаштування назв вісей і графіку
xlabel('Діаметр трубопроводу, d, м');
ylabel('Швидкість теплоносія, v, м/с');
zlabel('Приведена енергія, ГДж');
title('Функція сумарної приведенної енергії при постачанні теплової енергії ЦТ');
// Знаходження мінімального E у червоній зоні
red_zone_mask = (DD.^2 .* VV > threshold) & (DD >= 0) & (VV >= 0);
E_red_zone = E(red_zone_mask);

```

					Кваліфікаційна робота	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		104

```

if ~isempty(E_red_zone)
[ min_E, idx ] = min(E_red_zone);
D_min = DD(red_zone_mask)(idx);
V_min = VV(red_zone_mask)(idx);
disp("Мінімальне E у червоній зоні: "); disp(min_E);
disp("Відповідне D: "); disp(D_min);
disp("Відповідне V: "); disp(V_min);
else
disp("Червона зона порожня! Жодна точка не відповідає умові (D^2)*V > threshold,
D >= 0, V >= 0.");
end

```

5.6. Програмна реалізація комп'ютерного моделювання витрати первинної енергії на ділянці теплової мережі (для побудови графіків зміни оптимальних значень).

```

clear; clc;

// Константи
dE = 0.0003; // шорсткість, м
tau = 1; // час, година
eta = 0.95; // ККД
rho = 1000; // густина теплоносія, кг/м3
rho_steel = 7800; // густина сталі, кг/м3
d_thickness = 0.007; // товщина стінки трубопроводу, м
PEFel = 2.3;
PEFfuel = 1.1;
L = 1000;
T = 438000;

// Розрахунок коефіцієнтів
K1 = ((%pi * L * rho) / (72.7 * eta)) * (dE^0.25) * 10^(-3) * PEFel * tau;
K2 = 348 * 10^(-3) * L * PEFfuel * tau;
K3 = PEFfuel * tau;

// Діапазон діаметрів і швидкостей
d_vals = -0.5:0.0125:0.5; // м (81 значення)
v_vals = -10:0.125:10; // м/с (161 значення)

// Створюємо сітку
[DD, VV] = meshgrid(d_vals, v_vals);

// Діапазон потужностей (кВт), крок 2000 кВт
Q2_range = 1000:1000:40000;

// Режими температур
regimes = list([90,70], [130,70]);

```

					Кваліфікаційна робота	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		105

```

// Ініціалізація масивів для оптимальних значень
D_opt = zeros(length(Q2_range), length(regimes));
V_opt = zeros(length(Q2_range), length(regimes));

// Цикл по режимам
for r = 1:length(regimes)
    T1 = regimes(r)(1);
    T2 = regimes(r)(2);

// Цикл по потужностям
for q = 1:length(Q2_range)
    Q2 = Q2_range(q);

// Розрахунок порогового значення
threshold = 4 * Q2 / (%pi * 4.186 * (T1 - T2) * rho);

// Розрахунок матриці E
E = K1 * (DD.^0.75 .* VV.^3) + K2 * DD.^0.5 + K3 * (Q2 + 348 * DD.^0.5 * L * 10^-3);

// Маска червоної зони
red_zone_mask = (DD.^2 .* VV > threshold) & (DD >= 0) & (VV >= 0);
E_red_zone = E(red_zone_mask);

if ~isempty(E_red_zone)
    [min_E, idx] = min(E_red_zone);
    D_opt(q, r) = DD(red_zone_mask)(idx);
    V_opt(q, r) = VV(red_zone_mask)(idx);
else
    D_opt(q, r) = %nan;
    V_opt(q, r) = %nan;
    disp("Для Q2 = " + string(Q2) + " кВт та режиму " + string(T1) + "/" + string(T2)
+ " червона зона порожня!");
end
end
end

// Побудова графіків
// Графік для діаметрів
clf();
figure(1);
plot(Q2_range/1000, D_opt(:,1), 'b-', Q2_range/1000, D_opt(:,2), 'r-');
f = gcf();
f.background = -2;
a = gca();
a.background = -2;
xlabel('Потужність Q2, МВт');
ylabel('Оптимальний діаметр D, м');
title('Оптимальний діаметр трубопроводу для різних режимів');
legend('90/70', '130/70');

```

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						106
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```
// Графік для швидкостей
figure(2);
plot(Q2_range/1000, V_opt(:,1), 'b-', Q2_range/1000, V_opt(:,2), 'r-');
f = gcf();
f.background = -2;
a = gca();
a.background = -2;
xlabel('Потужність Q2, МВт');
ylabel('Оптимальна швидкість V, м/с');
title('Оптимальна швидкість теплоносія для різних режимів');
legend('90/70', '130/70');
```

					Кваліфікаційна робота	Арк.
						107
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список літератури

1. Capozzoli, A., et al. (2017). Mining typical load profiles in buildings to support energy management in the smart city context. *Energy Procedia*, 134, 865–874.
2. Zelenko, V. A., et al. (2019). Problema enerhoefektyvnosti u modeli staloho rozvytku Ukrainy: dosvid YeS. *Sotsialno-ekonomichni problemy suchasnoho periodu Ukrainy*, 1, 18–23.
3. Farenjuk, H. H., et al. (2013). Problemy podovzhennia resursu isnuichykh budivelnnykh ob'ektiv. *Budivelni konstruktsii*, 78, 53–59.
4. Skochko, V., et al. (2024). Minimization of heat losses in district heating networks by optimizing their configuration. *Problems of the Regional Energetics*, 3(63), 182–195.
5. Global Change Data Lab. (n.d.). *Our World in Data*.
<https://ourworldindata.org/>
6. Minfin. (n.d.). *Minfin — vse pro finansy*. <https://minfin.com.ua/>
7. Zaiats, V. (2019). Rozvytok zhytlovoho budivnytstva yak factor formuvannia zhytlovykh umov naseleennia. *Demohrafiia ta sotsialna ekonomika*, 2, 137–151.
8. Economidou, M., et al. (2020). Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings. *Energy and Buildings*, 225.
9. Byba, V., et al. (2013). Stan ta perspektyvy rozvytku budivelnoi haluzi Ukrainy. *Zbirnyk naukovykh prats PNTU im. Yu. Kondratiuka*, 4(2), 3–9.
10. Zhang, Y., et al. (2017). Comparison of evaluation standards for green building in China, Britain, United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 262–271.
11. Davis, I., et al. (2018). *Mapping of existing energy efficiency standards and technologies in buildings in the UNECE region*. United Nations Economic Commission for Europe.

					Кваліфікаційна робота	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		108

12. Moore, C., et al. (2019). *Building energy standards and labelling in Europe*. European Commission.
13. Pohosov, O., et al. (2025). Devising a methodology for assessing seasonal thermal energy generation by a combined heat source. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(8), 56–67.
14. Carlander, J., & Thollander, P. (2022). Drivers for implementation of energy-efficient technologies in building construction projects: Results from a Swedish case study. *Resources, Environment and Sustainability*, 10.
15. Pasichnyk, P., et al. (2024). Experimental study of the aerodynamic characteristics of a solar air collector with an absorber made of carbon textile. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (pp. 426–435).
16. Broberg, T., & Kažukauskas, A. (2021). Information policies and biased cost perceptions: The case of Swedish residential energy consumption. *Energy Policy*, 149.
17. McKenna, R., et al. (2013). Energy efficiency in the German residential sector: A bottom-up building-stock-model-based analysis in the context of energy-political targets. *Building and Environment*, 62, 77–88.
18. Narayanan, M., et al. (2021). Adaptiveness of a model predictive controller for a thermal-electrical renewable energy system in four different German single-family house energy standards. *Case Studies in Thermal Engineering*, 26.
19. Dolšak, J., et al. (2022). Estimating the efficiency in overall energy consumption: Evidence from Slovenian household-level data. *Energy Economics*, 114.
20. Oviir, A. (2016). Life cycle assessment (LCA) in the framework of the next generation Estonian building standard building certification as a strategy for enhancing sustainability. *Energy Procedia*, 96, 351–362.

21. Von Platten, J., et al. (2019). The renewing of energy performance certificates: Reaching comparability between decade-apart energy records. *Applied Energy*, 255.
22. Firląg, S. (2015). How to meet the minimum energy performance requirements of technical conditions in year 2021? *Procedia Engineering*, 111, 202–208.
23. Pohosov, O. H., & Malkin, E. S. (2015). Eksperymentalni doslidzhennia efektyvnosti vidsentrovnykh separatsiinykh prystroiv z podviinym vidvedenniam ridkoi fazy. *Zbirnyk naukovykh prats*.
24. Pohosov, O. H. (2011). Doslidzhennia potentsialu zastosuvannia prystroiv znyzhennia tysku nasychenoї pari z vyroblenniam elektroenerhii. *Conference proceedings*.
25. Zhao, J., et al. (2019). An influencing parameters analysis of district heating time delay. *Energy*.
26. Meibodi, S. S., et al. (2024). Modeling district heating pipelines using a hybrid dynamic ... *ScienceDirect source*.
27. Quaggiotto, D., et al. (2021). Management of a district heating network using model ... Springer.
28. Malkin, E. S., & Pohosov, O. H. (2014). Metodyka tekhniko-ekonomichnoho obgruntuvannia vprovadzhennia parovykh turbin maloi potuzhnosti... *Ventylatsiia, osvittennia ta teplohazopostachannia*, 17, 107–112.
29. Zimmerman, N., et al. (2019). Achieving lower district heating network temperatures. *Energy*.
30. Pohosov, O., Skochko, V., Kulinko, Ye., & Teteruk, D. (2024). *Optyimizatsiia teplovykh merezh metodom zmenshennia vytraty pervynnoi enerhii*. KNUBA.
31. Primary energy savings through thermal storage in district heating networks.

32. Guelpa, L., & Verda, V. (2019). Thermal energy storage in district heating and cooling systems: A review.
33. Techno-economic comparison of long-term thermal energy storage technologies for district heating applications.

					Атестаційна випускна робота	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		111